

**VALORACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y DE ADSORCIÓN DEL  
BIOCHAR OBTENIDO DE LODOS DE PTAR**

**JULIETH ALEJANDRA ACERO NITOLA  
MÓNICA GIL RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
TUNJA  
2018**

**VALORACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y DE ADSORCIÓN DEL  
BIOCHAR OBTENIDO DE LODOS DE PTAR**

**JULIETH ALEJANDRA ACERO NITOLA  
MÓNICA GIL RAMÍREZ**

**Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación para optar  
al título de Ingeniero Ambiental**

**Director:  
MSc. César René Blanco Zúñiga**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
TUNJA  
2018**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma presidente del jurado**

---

**Firma jurado**

---

**Firma jurado**

**Tunja, 14 de Marzo de 2018.**

**“La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto no responde de la opinión expresada en este proyecto”.**

**Se autoriza la reproducción total o parcial indicando su origen.**

**Copyright © 2018**

## DEDICATORIA DE MÓNICA

*A ti Dios Padre por guiarme, por ser bueno y bondadoso.*

*A mis Padres José Eliecer Gil, Claudia Ramírez Ospina, a mi hermana Marisela Gil Ramírez por brindarme su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por sostenerme en los momentos difíciles, pero sobre todo por quererme y entenderme.*

*A mis abuelitos Milciades Ramírez y Aura María Ospina, con quienes he compartido instantes memorables. A mi tía Ni, por ser cómplice, guía y maestra de locuras.*

*A angelita, por ser luz y alegría en mí, por permitirme ser parte de su vida, pero sobre todo por recordarme siempre al angelito que desde el cielo vela por nosotros.*

*A toda mi familia quienes de alguna manera me apoyaron siempre.*

*A Mónica por ser incondicional, a Daniel por impulsarme a crecer.*

*En memoria de mis abuelos Maruja Parra y Octavio Gil; y mis tías Lorena Ramírez y Carmen Gil.*

*A mis amigos y compañeros de aula, Angelita, Marisela, Cristian, Jesús, Sebastián, Daniela, Carlos, Yaní, Luisca, Alejandro; con quienes tuve la fortuna de vivir esta experiencia educativa.*

## DEDICATORIA DE JULIETH

*A ti mi Dios, tú eres mi principal inspiración y aliento de todos mis sueños, con amor te dedico lo que con amor me regalaste, con amor te dedico todo lo que recorrí en este tiempo.*

*A mis padres y mis hermanos Víctor Manuel Acero, Nubia Rocío Nitola, Angélica María, Nelson Leonardo, y toda mi familia, porque verlos en cada instante fue mi más preciada motivación para alcanzar este sueño, porque con sus esfuerzos y paciencia me brindaron la herencia más preciada del conocimiento*

*A mis maestros forjadores de esta linda profesión, mis compañeros y amigos que aunque tomaron rutas diferentes compartimos un mismo amor por nuestra carrera.*

*A todos aquellos que seguirán este camino y todos aquellos que lo van a comenzar, que sea un motivo para seguir dejando huella*

*A todo aquel que se acerque a este papel y anhele seguir cambiando el mundo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero César René Blanco, por redirigir y aconsejar durante el proceso de investigación desarrollado; por su entrega y colaboración y su valiosa ayuda durante el desarrollo de todo el proyecto. A la Ingeniera María del Pilar Triviño por la iniciativa en la idea de investigación y todo lo que nos aportó para llevar con éxito la ejecución de las actividades requeridas.

Al Ingeniero Orlando Vergel por su colaboración para desarrollar satisfactoriamente los ensayos de laboratorio; a la Ingeniera de Claudia Molina de la escuela de Metalurgia por el apoyo técnico en la ejecución de los análisis de caracterización. De la misma manera a la Ingeniera Gloria Lucía Camargo, quien desde su conocimiento y su labor como docente y evaluadora del proyecto orientó el proceso de investigación.

A los docentes de las escuelas de Ingeniería Ambiental y Metalurgia que han sido la base para este trabajo por proporcionar los conocimientos y el apoyo en nuestra formación personal y profesional. A los docentes del Laboratorio de Ingeniería ambiental por su disposición en la prestación de los servicios para la realización de los análisis necesarios.

A los laboratorios del grupo de investigación en Catálisis por los servicios prestados, y al Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (INCITEMA) por permitirnos realizar los ensayos requeridos para la finalización del proyecto. A la química Lina Hincapié por orientar y acompañar las diferentes etapas de la investigación; a los Ingenieros ambientales Alexander Parra y Daniela Bautista por estar prestos a cualquier inquietud.

A nuestros familiares, hermanos y amigos por impulsarnos a cumplir nuestros propósitos y por ayudarnos a alcanzar nuestras metas profesionales.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	18
<b>1.1 GENERAL</b> .....	18
<b>1.2 ESPECÍFICOS</b> .....	18
<b>2. MARCO REFERENCIAL</b> .....	19
<b>2.1 BIOSÓLIDOS</b> .....	19
2.1.1 Manejo de biosólidos en Colombia .....	20
2.1.2 Alternativas de disposición. ....	22
2.1.3 Normativa de biosólidos.....	23
2.1.4 Alternativas de aprovechamiento de biosólidos .....	25
<b>2.2 PIRÓLISIS</b> .....	28
2.2.1 Temperatura .....	28
2.2.2 Velocidad de calentamiento y tiempo de residencia .....	29
2.2.3 Tamaño de grano .....	29
2.2.4 Velocidad de enfriamiento .....	29
<b>2.3 BIOCHAR</b> .....	31
2.3.1 Características físicas y químicas del biochar. ....	32
<b>2.4 ADSORCIÓN</b> .....	33
2.4.1 Aplicación del biochar para el tratamiento de agua .....	33
2.4.2 Factores que afectan la adsorción de contaminantes en el biochar .	34
2.4.3 Mecanismos de adsorción de metales pesados .....	36
<b>2.5 PODER CALORÍFICO</b> .....	36
2.5.1 El poder calorífico y su relación con algunas variables fisicoquímicas .....	37
2.5.2 Poder calorífico de los subproductos de la pirólisis .....	38
<b>2.6 DRENAJE ÁCIDO DE MINAS</b> .....	39
2.6.1 Impactos ambientales del drenaje ácido de minas .....	39
2.6.2 Investigaciones referentes a la remoción de metales pesados en drenajes mineros usando materiales adsorbentes .....	41
<b>2.7 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS</b> .....	42
2.7.1 Análisis próximo: .....	42
2.7.2 Análisis elemental .....	44

2.7.3	Poder calorífico .....	44
2.7.4	Análisis textural y químico del biochar .....	44
2.7.5	Microscopia electrónica de barrido .....	45
2.7.6	Difracción de rayos X (XRD) .....	45
<b>2.8</b>	<b>ANÁLISIS QUÍMICO DE ELEMENTOS METÁLICOS EN MUESTRAS DE AGUA. ....</b>	<b>45</b>
2.8.1	Espectrofotometría de absorción atómica .....	45
<b>2.9</b>	<b>ASPECTOS GENERALES DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE SOTAQUIRÁ. ....</b>	<b>46</b>
<b>3.</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>48</b>
<b>3.1</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....</b>	<b>50</b>
3.2.1	Análisis próximo .....	50
3.2.2	Análisis elemental .....	54
3.2.3	Determinación del poder calorífico .....	54
<b>3.3</b>	<b>PROCESO DE CONVERSIÓN.....</b>	<b>55</b>
3.3.1	Pirólisis .....	55
<b>3.4</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DEL BIOSÓLIDO.....</b>	<b>56</b>
3.4.1	Análisis del biochar mediante microscopia electrónica de barrido ....	56
3.4.2	Difracción de rayos X (XRD) .....	57
<b>3.5</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINERÍA .....</b>	<b>57</b>
3.5.1	Recolección del drenaje de la mina .....	57
3.5.2	Preservación de la muestra. ....	57
3.5.3	Obtención de los parámetros fisicoquímicos del drenaje de mina. ....	58
<b>3.6</b>	<b>Estudio del biochar en el tratamiento del drenaje ácido de minas.....</b>	<b>58</b>
3.6.1	Métodos de caracterización para las muestras obtenidas del tratamiento del drenaje ácido.....	58
<b>3.7</b>	<b>Prueba de biosorción de cadmio en el agua sintética .....</b>	<b>59</b>
3.7.1	Análisis de cadmio en el agua sintética por espectroscopia de absorción atómica.....	59
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL DE LOS BIOSÓLIDOS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO .....</b>	<b>64</b>
4.3.1	Resultados del poder calorífico del biosólido .....	64



<b>4.4 RENDIMIENTO DEL BIOCHAR.....</b>	<b>66</b>
4.4.1 Caracterización del producto obtenido de la pirólisis .....	68
4.4.2 Resultados del poder calorífico del biochar .....	69
4.4.3 Máxima energía de pirólisis .....	72
<b>4.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LOS BIOCHARS .</b>	<b>72</b>
<b>4.6 DIFRACCION DE RAYOS X DEL BIOCHAR (XRD). ....</b>	<b>75</b>
<b>4.6 CARACTERIZACION DEL DRENAJE DE MINERÍA Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015 .....</b>	<b>78</b>
4.6.1 Eficiencia de los sistemas de tratamiento .....	80
4.6.2 Análisis en la remoción de hierro por adsorción en el drenaje ácido minero.....	81
4.6.3 Análisis de la remoción de sulfatos en el drenaje ácido.....	83
4.6.4 Resultados para los sistemas de tratamiento .....	85
<b>4.7 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL AGUA SINTÉTICA. ....</b>	<b>86</b>
4.7.1 Efecto del pH sobre la adsorción .....	87
4.7.2 Efecto de la fuerza iónica en la adsorción. ....	88
4.7.3 Capacidad de adsorción del biochar para Cadmio. ....	88
<b>4.8 EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOCHAR.....</b>	<b>89</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Lechos de secado PTAR Sotaquirá .....	46
Figura 2. Biosólidos PTAR Sotaquirá.....	47
Figura 3. Procedimientos de preparación del material para el análisis composicional .....	49
Figura 4. Procedimiento para la determinación del contenido de humedad ....	51
Figura 5. Procedimiento para la determinación del contenido de Materia volátil .....	52
Figura 6. Procedimiento para la determinación del contenido de cenizas .....	53
Figura 7. Proceso de pirólisis del biosólido en mufla .....	55
Figura 8. Experimento de adsorción del biochar en el agua sintética. ....	60
Figura 9. Imágenes MEB Biochar BC400 .....	74
Figura 10. Imágenes MEB Biochar BC500. ....	75
Figura 11. Comparación de los resultados del análisis de difracción de rayos X para los biochars BC400 y BC500. ....	76
Figura 12. Difractograma del Biochar obtenido a 400° Celsius.....	77
Figura 13. Difractograma del Biochar obtenido a 500° Celsius.....	78
Figura 14. Tanques de almacenamiento en la Mina Los Neisas.....	79

## LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Comparación del poder calorífico del biosólido y los biochars BC400 y BC500. ....	69
Gráfica 2. Variación del poder calorífico del biosólido, y los biochars con el porcentaje de cenizas. ....	70
Gráfica 3. Porcentaje de remoción de Hierro en cada tratamiento. ....	81
Gráfica 4. Porcentajes de remoción de sulfatos en cada tratamiento. ....	83
Gráfica 5. Porcentajes de remoción de Cadmio basados en el pH de la solución sintética. ....	87

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de las principales plantas de tratamiento de agua residual en Colombia. ....	21
Tabla 2. Comparación entre los diferentes tipos de pirólisis y las variables asociadas. ....	30
Tabla 3. Clasificación de la ASTM para carbones. ....	37
Tabla 4. Proceso empleado en la pirólisis del biosólido con distintas temperaturas finales .....	56
Tabla 5. Ficha de identificación de la muestra. ....	57
Tabla 6. Diluciones aplicadas a los sistemas de tratamiento con el Biochar .....	59
Tabla 7. Fracciones de granulometría de los biosólidos. ....	61
Tabla 8. Caracterización de Biosólidos PTAR Sotaquirá. ....	62
Tabla 9. Carbono fijo y relación Materia Volátil- Carbono Fijo para diferentes biomásas. ....	63
Tabla 10. Comparación del poder calorífico de algunas biomásas y combustibles comunes. ....	65
Tabla 11. Rendimiento de Biochar derivados de diferentes biomásas y su relación con la temperatura de pirólisis. ....	66
Tabla 12. Comparación de los parámetros de caracterización de los biosólidos y los productos obtenidos de la pirólisis. ....	68
Tabla 13. Comparación del poder calorífico de diferentes materiales y los biochars BC400 y BC500. ....	71
Tabla 14. Comparación de los valores obtenidos con los de la Resolución 0631 de 2015. ....	79
Tabla 15. Comparación de las capacidades de adsorción de diferentes materias adsorbentes para los iones Fe (II). ....	82
Tabla 16. Capacidad de adsorción de los biochars BC400 y BC500 para sulfatos. ....	84

Tabla 17. Comparación de los valores obtenidos del tratamiento del drenaje utilizando la muestra BC400 con los de la Resolución 0631 de 2015.....	85
Tabla 18. Comparación de los valores obtenidos del tratamiento del drenaje utilizando la muestra BC500 con los de la Resolución 0631 de 2015.....	86
Tabla 19. Comparación de las capacidades de adsorción de cadmio para varios materiales adsorbentes.....	89

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

DAM: Drenaje ácido de minas

SEM: Microscopia electrónica de barrido

XRD: Difracción de rayos X.

AA: Absorción atómica

## RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el potencial energético y de adsorción del biochar obtenido mediante la pirólisis del biosólido de la PTAR del Municipio de Sotaquirá. Inicialmente, se realizó la caracterización fisicoquímica del biosólido, la cual incluye análisis elemental, análisis próximo y el poder calorífico. La obtención de los biochars se consiguió mediante el proceso de pirólisis lenta del biosólido a 400 y 500 °C (Celsius). A su vez, se estimó el rendimiento de la fracción sólida para cada temperatura final del proceso. Los biochars producidos se analizaron mediante las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido, Difracción de Rayos X, Análisis elemental y análisis próximo.

Para valorar el potencial energético del biochar, se determinó el poder calorífico experimentalmente, así como el poder calorífico inferior, basado en el análisis elemental y el contenido de humedad. Por otra parte, se evaluó la eficiencia y el comportamiento del biochar, como material adsorbente en el tratamiento del drenaje ácido de una mina de carbón del Municipio de Samacá. Adicionalmente, se valoró la capacidad de adsorción del biochar para el metal cadmio en una muestra de agua sintética.

Los resultados del poder calorífico mostraron que el biochar presenta un contenido energético demasiado bajo con respecto al biosólido, el cual obtuvo un valor calorífico comparable con varias materias primas y combustibles sólidos, por lo cual, el aprovechamiento energético del biochar no resulta ser una buena alternativa como sustituto de otros combustibles utilizados. Dentro de los resultados obtenidos referentes a la adsorción del biochar en el DAM, se encontró que los porcentajes de remoción, utilizando las dos muestras de biochar, son similares para hierro y sulfatos. Con relación al agua sintética, se dedujo que el tratamiento con el biochar presenta una baja efectividad en la adsorción para cadmio, y que esta capacidad de adsorción depende en gran medida del pH de la solución. Se pudo establecer que el biochar tiene el potencial de remover contaminantes tanto en el DAM, como en el agua sintética, y que los tratamientos de adsorción pueden ser optimizados modificando las variables empleadas en la experimentación, y mejorando las propiedades superficiales del biochar.

**Palabras clave:** Biosólido, pirólisis, biochar, Drenaje ácido de mina, poder calorífico, adsorción.

## INTRODUCCIÓN

Los biosólidos son subproductos de carácter orgánico generados en los procesos de tratamiento del agua residual. La producción mundial de biosólidos, se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, como resultado del aumento de la población, mayor conexión a los sistemas de tratamiento y requisitos más estrictos en la calidad del agua y en la protección ambiental.

En Colombia se ha presentado una ampliación de la cobertura de acueductos, alcantarillados y plantas de tratamiento de aguas residuales para reducir la cantidad y el impacto ambiental de los residuos<sup>1</sup>. Los métodos convencionales para la disposición de biosólidos incluyen la incineración, la disposición en rellenos sanitarios, y el uso en aplicaciones agrícolas. Sin embargo, estas alternativas pueden generar efectos ambientales adversos, relacionados con la contaminación al suelo y a los cuerpos de agua subterráneos al utilizarse como enmienda agrícola por sus contaminantes inorgánicos y microorganismos patógenos, así como la emisión de sustancias tóxicas y material particulado, como resultado de una transformación incontrolada durante la incineración. La disposición en rellenos sanitarios estaría limitada por los costos de transporte y el espacio requerido.

Debido a los inconvenientes que implica la disposición final de estos subproductos, es propicio buscar alternativas orientadas a recuperar el valor energético de estos residuos y establecer aplicaciones que a su vez disminuyan el impacto ambiental.

En este sentido, la valorización energética de los biosólidos, a través de procesos termoquímicos, para la sustitución parcial de los métodos de disposición convencionales, se presenta como una solución económica, técnica y ambientalmente factible para el tratamiento de estos materiales. El presente trabajo se enfoca especialmente en la pirólisis como proceso termoquímico, que consiste en la descomposición térmica de sustancias orgánicas bajo condiciones limitadas de oxígeno, que conduce a la generación de productos sólidos, líquidos condensables y gases. Este sólido carbonoso o biochar obtenido mediante la pirólisis del biosólido, concentra los metales pesados, y se convierte en un material más estable química y biológicamente. De acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, el biochar ha encontrado muchas aplicaciones en diversas áreas. Su valor calorífico reviste gran interés para la producción de energía y se asocia con una reducción en la concentración de gases contaminantes. La búsqueda de energías renovables enfocadas en minimizar la dependencia de los combustibles fósiles, permite valorar el potencial energético del biochar como una alternativa eficiente y ambientalmente sostenible.

---

<sup>1</sup>MENDOZA GENEY, Libardo Enrique. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Trabajo de Grado (Doctor en Ingeniería- Ingeniería Mecánica y Mecatrónica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá. Colombia. 2016. p. 249.



Adicionalmente, las propiedades superficiales favorables del biochar y su bajo costo, lo convierten en un material óptimo para la remediación de aguas, mediante la adsorción de diferentes tipos de contaminantes.

El objetivo del presente estudio es evaluar el potencial energético y de adsorción del biochar obtenido a partir de la pirólisis de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de agua Residual del Municipio de Sotaquirá, ubicado en el Departamento de Boyacá. Para llevar a cabo este objetivo, se busca analizar el valor calorífico del biochar y evaluar la eficiencia en la remoción de contaminantes en el tratamiento del drenaje ácido minero y en una muestra de agua sintética.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 GENERAL**

Evaluar el potencial energético y de adsorción del Biochar obtenido a partir de los lodos provenientes de la PTAR del Municipio de Sotaquirá.

### **1.2 ESPECÍFICOS**

- Realizar una caracterización del lodo obtenido de la PTAR del Municipio de Sotaquirá.
- Establecer las mejores condiciones de obtención del Biochar.
- Determinar el potencial energético del Biochar obtenido.
- Estimar la capacidad de adsorción del Biochar en el tratamiento del agua residual proveniente de una mina de carbón del Municipio de Samacá y en una solución preparada en el laboratorio.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 BIOSÓLIDOS

De acuerdo con Daguer, el biosólido es “el producto remanente, líquido, sólido o semisólido, originado después de un proceso mecánico biológico de estabilización de lodos orgánicos provenientes del tratamiento de las aguas residuales”<sup>2</sup>.

La Agencia de protección ambiental (EPA) en su código 40 CFR 503 también define a los biosólidos como “sólidos provenientes del tratamiento de las aguas residuales y estabilizados biológicamente, con suficiente concentración de nutrientes, bajo contenido de microorganismos patógenos, presencia permisible de metales pesados, que se puede utilizar como fertilizante, acondicionador o mejorador de suelos, de acuerdo con la composición fisicoquímica de los biosólidos y la vocación de uso del suelo”<sup>3</sup>

Básicamente los procesos y operaciones unitarias que se efectúan en las plantas de tratamiento de aguas residuales, conllevan la generación de diferentes volúmenes de lodo. De acuerdo con Arnaiz., et. al., se obtienen en la sedimentación primaria, y como productos resultantes de la conversión de la biomasa de residuos solubles en el tratamiento secundario<sup>4</sup>. Su tratamiento y evacuación es uno de los problemas más complejos, por su gran contenido en sólidos, y su composición química. En este sentido, es conveniente acondicionar los lodos residuales mediante procesos de estabilización y deshidratación, para asegurar una adecuada disposición final y reducir sus efectos negativos al ambiente. Según Daguer, la estabilización se lleva a cabo para reducir el nivel de patógenos, la degradación biológica y su capacidad de atracción de vectores<sup>5</sup>.

Las técnicas de estabilización de lodos más comunes, incluyen la digestión aerobia, la digestión anaerobia, la estabilización alcalina, el tratamiento térmico y el compostaje.

---

<sup>2</sup>ROZO, Nicolás Andrés. “Efecto de la aplicación de mezclas de biosólidos y estériles sobre las primeras etapas de la sucesión en la antigua arenera Juan Rey, Bogotá- DC. Trabajo de grado (Ecología): Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de estudios ambientales y rurales. Facultad de Ecología. 2007; p. 92.

<sup>3</sup>QUINCHÍA, Adriana; CARMONA, Dora. Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. En: Escuela de Ingeniería de Antioquia. No. 2 (Agosto.,2004); pp. 89–108. ISSN 1794-1237.

<sup>4</sup>CONSUELO, Ileana., et. al. “Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos “. Medellín. Colombia, vol. 29, no. 1, pp. 64, 2016.

<sup>5</sup>RODRIGUEZ PÉREZ, Yaneth. “Estudio preliminar de lotes con diferente historial de incorporación de biosólidos provenientes de la PTAR El Salitre en la escombrera El Corzo , Bogotá” Universidad Nacional de Colombia. 2016. p.14.

Los procesos de digestión de lodos están enfocados en la degradación de la materia orgánica por la acción de microorganismos. Según Ozores y Méndez la digestión anaerobia se basa en el uso de bacterias anaerobias que procesan el biosólidos dentro de un digestor y mediante la fermentación se libera metano y agua residual, una de las ventajas de este tratamiento es que se disminuye la materia orgánica lo que se traduce en una pérdida significativa de su acción contaminante<sup>6</sup>. Guerrero., et. al., sugieren que la obtención de biogás en el proceso de digestión anaerobia es una fuente de energía renovable, el cual puede ser usado como combustible para compensar los requerimientos de energía de las plantas<sup>7</sup>.

Para López, el secado térmico, es una técnica apropiada que, posterior a la deshidratación, permite la reducción en peso y volumen de este subproducto, facilitando su gestión final<sup>8</sup>. Es un proceso que promueve la valorización del lodo y aumenta su poder calorífico.

Según Andreoli., et.al., en el tratamiento alcalino se adicionan productos que inhiben la actividad biológica y oxidan la materia orgánica, principalmente la aplicación de cal, eleva el pH para lograr remociones significativas de patógenos y adicionalmente reduce los olores generados en los biosólidos estabilizados. De acuerdo con la EPA, este proceso alcanza efectividad, mediante la combinación de dos mecanismos, el primero es la elevación del pH, y el segundo es el incremento en la temperatura con periodos de tiempo específicos<sup>9</sup>. El producto final puede ser incorporado en la agricultura y para el mejoramiento de suelos.

Soliva y Huerta consideran que el compostaje de lodos es una técnica de estabilización de los residuos orgánicos, mediante la transformación de estos en productos estables, aplicables al suelo, por la acción de microorganismos bajo ciertas condiciones ambientales controladas, pueden ser incorporados en la producción de cultivos y facilitan la gestión de los residuos, reduciendo su peso y volumen<sup>10</sup>.

### **2.1.1 Manejo de biosólidos en Colombia**

Actualmente, en Colombia, se generan diariamente 274 toneladas de biosólidos, de las cuales el 97% de la producción corresponde a las Plantas de tratamiento de aguas residuales, El salitre, San Fernando, Cañaveralejo, y Río Frío. Según

---

<sup>6</sup>BOLÍVAR MELÉNDEZ, Nydiana Astrid; BETANCUR, John; RODRÍGUEZ VALENCIA Nelson. Estudio evaluativo de manejo de biosólidos en el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad Cooperativa de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá-Colombia. Universidad de Manizales, Centro de Investigaciones CIMAD, No. 37, pp. 1–10.

<sup>7</sup> CONSUELO, Ileana., et. al. Op. cit. p. 64

<sup>8</sup> LÓPEZ PALOMINO, Andrea Carolina. “Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normatividad en la PTAR Río Frío, Bucaramanga (Santander)”,. Especialización en planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales.Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. 2015. p. 14.

<sup>9</sup>TORREZ, Patricia; MADERA, Carlos; SILVA, Jorge. “Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas,” En: Escuela de Ingeniería de Antioquia. No. 11 (Julio.,2009); pp. 21-37. ISSN 1794-1237.

<sup>10</sup> HUERTA, Oscar; SOLIVA, Montserrat., “Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas,” Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. UPC.,p. 1–9, 2004.

Daguer, la entrada en operación de plantas de tratamiento de aguas residuales en las grandes ciudades de Colombia ha generado un incremento en la producción de biosólidos<sup>11</sup>.

Tabla 1. Características de las principales plantas de tratamiento de agua residual en Colombia.

Parámetro	El Salitre (Bogotá)	San Fernando (Medellín)	Cañavalejo (Cali)	Río Frio (Bucaramanga)
Humedad (%)	67	68	66	29
Sequedad (%)	33	32	34	71
Caudal máximo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	4,0	3,6	3,5	0.55
Producción, base húmeda (t d <sup>-1</sup> )	160	90	80	2
Producción base seca (t d <sup>-1</sup> )	43	28	20	1.4
Tipo de tratamiento	Primario	Secundario (lodos activados)	Primario	Secundario (lagunas facultativas)
Tratamiento de lodos	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia

Fuente: (ALBORNOZ PINEDA, Angie Mabel and ORTEGA VALENCIA, Elmer Mauricio). “Evaluación de la eficiencia de la lombriz roja Californiana *E. foetida* para estabilización de lodos residuales de la PTAR Salitre,” 2017. Bogotá, 2017.

De acuerdo con los requerimientos establecidos por la EPA, y la normativa colombiana según el Decreto 1287 de 2014 los biosólidos de la PTAR El Salitre son de clase B, es decir, presentan una concentración de alta calidad con respecto a metales pesados y a los criterios microbiológicos, aptos para ser utilizados como cobertura de rellenos sanitarios<sup>12</sup>. Sin embargo, la reducción de sitios para su disposición normal o temporal, motivan la búsqueda de nuevas alternativas para el manejo de este producto. La incorporación de éstos en sitios específicos, ha mejorado las características del suelo en cuanto a la materia orgánica y nutriente como nitrógeno y fósforo, sin reportar efectos adversos por metales pesados y por bioindicadores de riesgo ambiental como coliformes fecales<sup>13</sup>.

No obstante algunos estudios llevados a cabo por Chávez y Loaiza han valorado la posibilidad de que los biosólidos de esta PTAR puedan ser tratados mediante vermicompostaje<sup>14</sup>.

Entre tanto, un estudio para la viabilidad técnica de compostaje de los biosólidos obtenidos en la planta depuradora de Cali, plantea su factibilidad como acondicionador de terrenos para el mejoramiento de suelos y cultivos agroindustriales. Adicionalmente, se ha implementado la tecnología Green-

<sup>11</sup> ALBORNOZ PINEDA, Angie Mabel; ORTEGA VALENCIA, Elmer Mauricio. “Evaluación de la eficiencia de la lombriz roja californiana *E. Foetida* para estabilización de lodos residuales de la PTAR Salitre”. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad Santo Tomas de Aquino. Facultad de Ingeniería. 2017. Bogotá, 2017, 87 h.

<sup>12</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287(10, Julio. 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014. 15 p.

<sup>13</sup> RODRIGUEZ PÉREZ, Yaneth., Op. cit. p. 9.

<sup>14</sup> BOLÍVAR MELÉNDEZ, Nydiana Astrid., et. al. Op. cit. p. 8.

house para el secado solar del 30% de los lodos, facilitando su gestión y su posterior aprovechamiento. El biogás obtenido por la digestión anaerobia se utiliza en la generación de energía eléctrica para el funcionamiento de la planta<sup>15</sup>.

El manejo de los biosólidos de la PTAR de Río Frío, se rige de acuerdo a lo establecido por la normativa Colombiana, mediante el compostaje, López indica que bajo este tratamiento se reducen los riesgos asociados a la generación de olores y vectores<sup>16</sup>. El producto final es empleado como abono en las diferentes zonas verdes de la planta, y también es utilizado en procesos de reforestación.

Con respecto a la planta de tratamiento San Fernando de Medellín, algunos estudios han indicado la importancia de valorar nuevas alternativas para la gestión de los biosólidos, Guerrero plantea la codigestión anaerobia, para optimizar la eficiencia de los digestores de la planta de tratamiento de agua residual, mediante la adición de sustratos orgánicos como residuos de alimentos a los lodos, que mejoran la relación de carbono y nitrógeno de los lodos, y aumentan la producción de metano<sup>17</sup>.

Según Vélez, en Colombia se han realizado ensayos preliminares sobre la reutilización de biosólidos, entre los que se destaca la protección de taludes, proyectos forestales, recuperación de suelos de minería, explotación de canteras y usos agrícolas y pecuarios<sup>18</sup>.

### **2.1.2 Alternativas de disposición.**

Las alternativas de disposición final de los biosólidos generados en un PTAR están condicionadas por la calidad de su composición, que a su vez depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes presentados a continuación.

- **Metales**

Principalmente zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr). Su potencial de acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación suscitan preocupaciones, pero se debe tener en cuenta que los metales en las aguas residuales domésticas están siempre presentes en concentraciones bajas, las concentraciones preocupantes son sobre todo las que se encuentran en las aguas residuales industriales.

Según el Decreto 1287 de 2014, los metales pesados que se deben evaluar en los biosólidos son: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, molibdeno, níquel, plomo, selenio y zinc<sup>19</sup>.

---

<sup>15</sup> QUINTANA VALENCIA, Judith Marcela. "Estudio para la viabilidad técnica de compostaje a partir de biosólido seco proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Cañaveralajejo Cali". Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial). Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Agroindustrial. Cali, 2012.

<sup>16</sup> LÓPEZ PALOMINO, Andrea Carolina., Op. cit. p. 15.

<sup>17</sup> CONSUELO, Ileana., et. al. Op. cit. p. 8.

<sup>18</sup> RODRIGUEZ PÉREZ, Yaneth., Op. cit. p. 28

<sup>19</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287(10, Julio. 2014).,Op. cit. p 3.

- **Nutrientes y materia orgánica:**

Su peligrosidad radica en su potencial de eutrofización para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos al igual que la materia orgánica. La aplicación de biosólidos en suelos agrícolas establecida por la Normativa Colombiana para tasas agronómicas, considera la adición principalmente de nutrientes como nitrógeno, fósforo y micronutrientes.

- **Contaminantes orgánicos:**

Los plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agente tenso activo y muchas otras moléculas orgánicas complejas, generalmente con poca solubilidad en agua y elevada capacidad de adsorción, tienden a acumularse en los lodos. Dentro de las características más importantes es su variado potencial de biodegradación. No obstante, son motivo de preocupación por sus efectos potenciales sobre el ambiente y la salud humana.

- **Agentes patógenos:**

Los agentes patógenos más importantes que se han encontrado en los lodos son las bacterias, los virus (especialmente enterovirus), los protozoos, los trematodos, los cestodos y los nematodos<sup>20</sup>. Los parámetros microbiológicos que se deben tener en cuenta para la caracterización de los biosólidos de acuerdo con la Normatividad Colombiana son: coliformes fecales, huevos de helmintos viables, salmonella y virus entéricos o fagos somáticos<sup>21</sup>.

### **2.1.3 Normativa de biosólidos**

La agencia de Protección Ambiental en la parte 503 de la Norma 40 CFR establece criterios en cuanto al manejo de lodos y biosólidos, indicando valores límites de metales pesados, calidad microbiológica, atracción de vectores y propone la implementación de tratamientos para su estabilización<sup>22</sup>.

En Colombia, el manejo y el uso de los biosólidos, está reglamentado por el Decreto 1287 del 10 de Julio de 2014 expedido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, mediante el cual, se establecen los criterios para el uso de los biosólidos producidos a partir de los lodos generados en las plantas de Tratamiento de aguas residuales municipales. Se enfatiza en la importancia de valorar los posibles usos y la disposición final de estos subproductos de acuerdo con sus características físicas, químicas y microbiológicas<sup>23</sup>. En este sentido es imprescindible la aplicación de un tratamiento previo de estabilización, con el fin

---

<sup>20</sup> LÓPEZ PALOMINO, Andrea Carolina., Op. cit., p. 5

<sup>21</sup> VÉLEZ ZULUAGA, Juan Alberto. Los biosólidos: ¿Una solución o un problema?. Producción más limpia. Vol. 2 No. 2. Julio - Diciembre 2007. p. 15.

<sup>22</sup> EPA, 40 CFR Part 503 - STANDARDS FOR THE USE OR DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE., [en línea],- 26 Octubre de 2017. Disponible en Internet en: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/chapter-I>

<sup>23</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287(10, Julio. 2014). Op. cit. p 3.

de reducir la carga contaminante, y la inactivación de los microorganismos patógenos, para fomentar la inclusión de los biosólidos en la agricultura y considerarlos en los procesos de restauración del suelo.

Los parámetros establecidos por el Decreto para la caracterización de los biosólidos se basan en los criterios químicos dentro de los que se encuentran varios elementos metálicos y los criterios microbiológicos. No obstante, el cumplimiento de los valores máximos permisibles de cada criterio define la categorización del biosólido que determina el uso final del material residual. Adicionalmente se fijan los valores máximos permisibles para el uso de estos subproductos en referencia a la categorización.

En este sentido, en los artículos 4 y 5 se establecen las variables para la caracterización de los biosólidos de acuerdo con los criterios químicos y microbiológicos, y los valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos.

El artículo 8 hace referencia a las alternativas de uso de los biosólidos, de acuerdo con la categoría y la clasificación, los biosólidos pueden ser empleados de la siguiente forma:

- **Categoría A**

- a. En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.
- b. Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.
- c. En agricultura. .
- d. Los mismos usos de la Categoría B.

- **Categoría B**

- a. En agricultura, se aplicará al suelo.
- b. En plantaciones forestales.
- c. En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.
- d. Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Los procesos de elaboración y características de los productos finales y su uso, queda sujeto a la regulación establecida por el ICA.
- e. Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
- f. Como insumo en la fabricación de materiales de construcción.



- g. En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial, secundaria o terciaria.
- h. En la operación de rellenos sanitarios tomo: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo.
- i. Actividades de revegetalización y paisajismo de escombreras.
- j. En procesos de valorización energética

#### **2.1.4 Alternativas de aprovechamiento de biosólidos**

- **Aprovechamiento energético**

En cuanto al aprovechamiento energético de los biosólidos, estos presentan un contenido energético significativo. El valor calorífico de los biosólidos procedentes de la depuración de aguas residuales, es similar al del carbono, lo que les posibilita ser utilizados como combustible alternativo, pues conlleva a un ahorro neto en la emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dado que sus emisiones no contabilizan por ser biomasa, al contrario si estos se depositan en vertederos, ya que sus emisiones contabilizan a través de la fermentación.

El contenido energético de los biosólidos les otorga un potencial para ser sometidos a procesos térmicos como: pirólisis, gasificación, combustión y oxidación húmeda. Las desventajas de emplear los procesos térmicos para los biosólidos, reside en el hecho que se requiere no sólo de un exceso de energía (excepto gasificación) para alcanzar altas temperaturas, sino también de equipos sofisticados, aparte de la emisión de una cantidad significativa de compuestos contaminantes a la atmósfera como dioxinas y furanos.

De acuerdo con Appels., et. al., otra alternativa de aprovechamiento térmico de los biosólidos es la generación de biogás producido a través del proceso de digestión anaerobia de los mismos, que suministra cuatro alternativas básicas de utilización; la producción de calor y vapor de agua, la generación de electricidad/co-generación, el uso como combustible para vehículos, y (posiblemente) la producción de productos químicos<sup>24</sup>.

- **Materiales de construcción**

Utilizar biosólidos estabilizados como aditivos para material de construcción constituye otra alternativa para su destino final. De acuerdo con Kaantee., et. al., la inertización o mineralización de los mismos en matrices cerámicas mediante

---

<sup>24</sup> CANO LONDOÑO, Natalia Andrea "Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá).," Medellín, 2012, p. 178. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

incineración permite obtener materiales aptos para la construcción como ladrillos y cemento, o como mejoradores de ciertas propiedades de dichos materiales<sup>25</sup>.

Un proyecto desarrollado por el Ministerio de ambiente y desarrollo rural de Castilla en España en asociación con varios centros tecnológicos, indican que el empleo de los lodos residuales en la industria cerámica permite un manejo adecuado de los residuos, debido a que genera una doble valorización, tanto en la reutilización de este lodo como materia prima en la fabricación de materiales de construcción, y un ahorro energético del proceso, así mismo se reducen las cantidades de lodo depositadas en los vertederos<sup>26</sup>.

Al igual que en los procesos térmicos, la restricción más grande de utilizar los biosólidos como aditivos para materiales de construcción reside en la emisión de sustancias nocivas y metales pesados; en algunos casos este proceso modifica física y/o químicamente los metales, convirtiéndolos de su forma elemental a óxidos metálicos o complejos organometálicos, o del estado sólido a vapor o finas partículas; es así como estos cambios pueden resultar en un incremento de la toxicidad de los mismos<sup>27</sup>.

- **Incineración**

La incineración de los biosólidos es otro de los procesos térmicos utilizados por razones de rentabilidad. Comparándolo con los altos costos de transporte asociados a la aplicación en tierra, la incineración resulta económica; pues a pesar de que también requiere de transporte, los costos son soportados total o parcialmente por el producto final, este método es seguro y no afecta el medio ambiente ya que el producto final de la incineración lo constituye una ceniza estéril, exenta de patógenos e inodora<sup>28</sup>.

Sin embargo los requerimientos dados por la EPA en la parte 503 de la Norma, con respecto a la incineración de biosólidos, establecen límites de emisiones, en cuanto al material particulado y mercurio normas operacionales, prácticas de manejo y requisitos de monitoreo y mantenimiento de los incineradores<sup>29</sup>.

- **Suelos**

El uso y aprovechamiento del biosólido en suelos, constituye una de las alternativas debido a que los biosólidos son materiales orgánicos ricos en materia orgánica con contenidos de 60 al 70%, y nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas, como el Nitrógeno, Fosforo y Potasio<sup>30</sup>. Por lo tanto,

---

<sup>25</sup> Ibid., p. 28.

<sup>26</sup> "Proyecto ECOCERÁMICA – Informe LAYMAN-1." Disponible en: [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/files/laymanReport/LIFE05\\_ENV\\_E\\_000301\\_LAYMAN.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/files/laymanReport/LIFE05_ENV_E_000301_LAYMAN.pdf).

<sup>27</sup> CANO LONDOÑO, Natalia Andrea., Op. cit., p.29.

<sup>28</sup> Ibid., p.28.

<sup>29</sup> MEDINA MUÑOZ, Juan Pablo. "Modelamiento y simulación de la pirólisis de una partícula de lodo de aguas residuales en un lecho fluidizado". Bogotá, 2012, p.164. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de procesos y energía Medellín.

<sup>30</sup> RODRIGUEZ PÉREZ, Yaneth., Op. cit. p. 52.

pueden ser utilizados como acondicionadores de suelos para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, especialmente aquellos degradados o alterados.

De igual manera Chávez y Loaiza, afirman que el uso de estos subproductos, ayudan en la recuperación de zonas con altos índices de erosión, terrenos devastados por actividades mineras, siendo uno de los principales uso de los biosólidos, la agricultura, ya que impacta las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo<sup>31</sup>.

En la recuperación o restauración de suelos, los biosólidos estabilizados son también útiles cuando se presentan incendios forestales o degradación de los mismos por prácticas agrícolas y humanas, la aplicación de biosólidos en este tipo de zonas favorece el aumento de materia orgánica, funcionando como una clase de enmienda de tipo orgánico que favorece el emplazamiento alterado, al igual que se evita la erosión hídrica gracias a las mejoras físicas<sup>32</sup>.

Para Moffet., et. al., los beneficios de los biosólidos no se limitan solamente a los compuestos químicos funcionales que se proporcionan al suelo, la aplicación de los biosólidos también se ha propuesto para mejorar la retención e infiltración del agua, la densidad aparente y la porosidad del suelo<sup>33</sup>.

De acuerdo con Rojas y Mendoza, se sabe que uso de los biosólidos resultante de la digestión anaerobia, permite aprovecharlo como fertilizante agrícola, con un alto contenido de nutrientes, restaurador de suelos, materia prima para la elaboración de materiales de construcción y en producción de energía, permitiendo el uso de una energía renovable y limpia, además de capturar GEI, generados en el tratamiento<sup>34</sup>.

Sin embargo, Qin, Zhenli y Stofella, analizaron la aplicación de biosólidos en suelos de Estados Unidos y concluyeron que existen limitaciones en la aplicación del biosólido en suelos y con fines agrícolas, debido al contenido de metales, la presencia de patógenos, y compuestos orgánicos que provienen de las aguas residuales industriales y domésticas, adicionalmente los nutrientes excesivos pueden causar la eutrofización de las aguas<sup>35</sup>. La implementación de métodos de manejo de los biosólidos debe contemplar las tasas agronómicas, prácticas de conservación de suelos, la protección de especies en vía de extinción, entre otras.

---

<sup>31</sup> BOLÍVAR MELÉNDEZ, Nydiana Astrid., et. al. Op. cit, p. 4.

<sup>32</sup> CANO LONDOÑO, Natalia Andrea., Op. Cit., p.39.

<sup>33</sup> RAWLINSON, Ben "Assessing aspects of the effectiveness of biosolids application and soil incorporation assessing aspects of the effectiveness of biosolids application and soil," 2012., p.16.

<sup>34</sup> CANO LONDOÑO, Natalia Andrea., Op. cit., p.4.

<sup>35</sup> LU, Qin; HE, Zhenli L., and STOFFELLA, Peter J., "Land Application of Biosolids in the USA : A Review," vol. 2012, 2012. En: Hindawi Publishing Corporation Applied and Environmental Soil Science, pp. 11. ID 201462.

- **Rellenos sanitarios**

En lo referente a la disposición de biosólidos en rellenos sanitarios, esta práctica ha ido disminuyendo sustancialmente por la creciente restricción de la normativa legislativa para esta disposición, por los elevados costos de multas y por las múltiples desventajas y efectos perjudiciales que trae consigo al medio ambiente y por ende a la cadena trófica<sup>36</sup>.

## **2.2 PIRÓLISIS**

La pirólisis es un proceso termoquímico de transformación de la biomasa en combustibles útiles, (ácidos piroleñosos, gases y biocarbones), con un alto rendimiento, mediante el calentamiento a temperaturas moderadamente altas en un rango entre 350 a 650°C Celsius, en una atmósfera reductora (oxígeno a baja concentración). Por su modelo sostenible, es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables<sup>37</sup>.

Este proceso, hace uso de diferentes tipos de material orgánico, como residuos agrícolas y forestales, así como el uso de desechos sólidos urbanos. En este sentido, la inclusión de nuevas fuentes de energía, permite la disminución de gases contaminantes y por otra parte, la disposición ambiental adecuada de los residuos. Brick<sup>38</sup> plantea la utilización de lodos residuales, como materia prima en la pirólisis, para la obtención de subproductos con potencial energético, siendo una alternativa viable para la disposición de estos residuos, y la exclusión de patógenos que puedan resultar nocivos para el hombre.

De acuerdo con Medina, en el proceso de pirólisis, los lodos estabilizados o los biosólidos, se convierten en char (carbonizado), cenizas, alquitrán, vapor de agua y gases combustibles. Parte de estos productos se toman como recursos energéticos en el proceso de pirólisis<sup>39</sup>. La pirólisis involucra una serie de reacciones químicas complejas, en las que influyen algunos factores como la estructura y composición de la materia prima, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la velocidad de enfriamiento y la temperatura del proceso. A continuación, se describen algunos de los factores mencionados, que interfieren en la fracción de los productos finales.

### **2.2.1 Temperatura**

La temperatura es una de las variables que limita la degradación térmica, ya que diferentes tipos de biomasa tienen temperaturas de descomposición distintas. Este parámetro, define el grado de rompimiento de cadenas y enlaces químicos

---

<sup>36</sup>CANO LONDOÑO, Natalia Andrea., Op. cit., p.30.

<sup>37</sup> URIEN PINEDO, Andrea.“Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual”. Bogotá, 2013, p. 83. Trabajo de grado(Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química). Universidad Nacional de Educación a Distancia. Facultad de Ciencias. Departamento de Ciencias Analíticas.

<sup>38</sup> ESCALANTE REBOLLEDO, Ariadna., et. al.“Biocarbón ( biochar ) I : Naturaleza , historia , fabricación y uso en el suelo,”. En: Terra latinoamericana. E-ISSN: 2395-8030. [en línea] 2016, 34 [Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2017] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>> ISSN.

<sup>39</sup> MEDINA MUÑOZ, Juan Pablo., Op. cit., p.29.

en los compuestos. Por tanto, determina el rendimiento de las fracciones de cada producto, así como la composición de las mismas. Adicionalmente, algunos estudios realizados por Romero et. al., han indicado que a medida que aumenta la temperatura en el proceso de pirólisis, se incrementa la proporción de gases producidos y disminuye la de combustibles líquidos y sólidos<sup>40</sup>.

### **2.2.2 Velocidad de calentamiento y tiempo de residencia**

Las tasas de calentamiento altas con evacuación rápida de la fase volátil, minimizan el contacto entre la fase volátil y la fase sólida en la zona de reacción. Por ende, el tiempo de condensación de los compuestos volátiles es reducido, generando una mayor producción de gases. Al contrario, las tasas de calentamiento bajas y moderadas sin la evacuación de la fase volátil promueve la formación de carbonizado al permitir mayor tiempo de contacto entre la fase volátil y sólida. Gómez, Klose y Rincón sugieren que el uso de una velocidad de calentamiento baja y moderada puede promover un calentamiento homogéneo, evitando la formación de gradientes térmicos en las partículas<sup>41</sup>.

### **2.2.3 Tamaño de grano**

Es una característica física que tiene una influencia importante en las reacciones de pirólisis. Entre mayor sea el tamaño del grano, mayor es el tiempo necesario para que los productos primarios abandonen la partícula. Este factor, promueve el desarrollo de reacciones secundarias entre las fases volátil y sólida, gradientes térmicos y la condensación de la fase volátil en la superficie de las partículas incrementando la producción de residuos sólidos. En cambio, si la partícula tiene un tamaño de grano pequeño las reacciones que se presentan se dan a partir únicamente del material sólido, es decir, reacciones homogéneas, en una sola fase, debido a la migración rápida de los productos de la partícula<sup>42</sup>.

### **2.2.4 Velocidad de enfriamiento**

Es un factor importante para la obtención de bioaceite. Bridgwater afirma que el enfriamiento lento conduce a la condensación de los derivados de la lignina, es decir, los líquidos viscosos. A su vez, el enfriamiento rápido resulta ser eficaz para la recolección de bioaceite<sup>43</sup>. De acuerdo con las características físicas y químicas de la biomasa, se pueden obtener diferentes fracciones de materia volátil, sólida y líquida para las mismas condiciones en el tratamiento. Los

---

<sup>40</sup> ROMERO MILLÁN, Lina María; CRUZ DOMÍNGUEZ, María Alejandra; SIERRA VARGAS Fabio Emiro. Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Centro de investigaciones y desarrollo científico. Tecnura. Vol. 20, Núm. 48 (2016). Disponible en: <<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/10551/12038>>

<sup>41</sup> GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang; RINCÓN Sonia. Pirólisis de Biomasa. Cuesco de palma de aceite. Universidad de Kassel. Kassel: División de Termodinámica – Instituto de Ingeniería Térmica. Universidad Nacional de Colombia, 2008. p. 48

<sup>42</sup> MONROY PEÑA, Camilo Antonio. Modelación Cinética de Pirólisis de Biomasa. Bogotá, 2013, 203 H. Trabajo de Grado (Magíster en Ingeniería- Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

<sup>43</sup> MONTAÑA ARBELÁEZ, Jorge Ivan., et. al. Pirólisis rápida de biomasa. Ecopetrol. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín, 2014. p. 61.

principales constituyentes de la biomasa, como lo son la hemicelulosa, la lignina y la celulosa se caracterizan por tener reactividad diferente, con escalas de descomposición térmica distintas. El proceso de descomposición de estos compuestos, se puede demostrar mediante el comportamiento térmico en distintas zonas:

**Zona I:** temperaturas aproximadas a 100°C Celsius. Evaporación de la humedad superficial de la biomasa

**Zona II:** temperaturas entre 100 y 250°C Celsius. Comienzo de la descomposición de líquidos extractivos

**Zona III:** temperaturas entre 250 y 400°C Celsius descomposición de la hemicelulosa. La degradación térmica se efectúa por despolimerización. Se generan principalmente material sólido o biochar, materia volátil condensable (vapores de agua y alquitrán, hidrocarburos, ácidos, CO, CO<sub>2</sub>. Se forma una matriz de carbono amorfa y rígida

**Zona IV:** temperatura entre 400 °C Celsius y 500 °C Celsius. Predomina la descomposición de la celulosa y la lignina. Se presenta degradación del carbón. Se libera monóxido y dióxido de carbono, y aromáticos de la matriz carbonosa. Se presenta el mayor rendimiento de bioaceite en este intervalo.

**Zona V:** temperaturas superiores a 500°C Celsius. Descomposición de la lignina, el proceso dominante es la carbonización. Predominan reacciones de craqueo de volátiles, que aumenta la producción de gases no condensables<sup>44</sup>.

Tabla 2. Comparación entre los diferentes tipos de pirólisis y las variables asociadas.

Proceso de pirólisis	Temperatura a °C Celsius	Velocidad de calentamiento °C Celsius/s	Tiempo de residencia	Producto mayoritario
Lenta	500	2	Gases 5 (s) Sólido (horas)	Carbonizado y condensables
Rápida	400-800	>2	Gases <2 s	Condensables
Instantánea	>600	>200	Gases >0.5 s	Gases y alquitranes

Fuente: Autores.

Lehmann considera que la temperatura óptima para la elaboración del biocarbón se encuentra en el rango entre 450 y 550° C<sup>45</sup>. La energía extraída del proceso de pirólisis en forma de gases y biocombustibles, puede emplearse para retroalimentar el proceso y para reducir el porcentaje de humedad de la materia prima. Adicionalmente, la aplicación de estos productos como combustibles,

<sup>44</sup> MONROY PEÑA, Camilo Antonio., Op. cit. p. 51.

<sup>45</sup> ESCALANTE REBOLLEDO, Ariadna., et. al. Op. cit. p. 7.

minimiza la generación de emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, y conduce a la generación de energía térmica y mecánica<sup>46</sup>.

## 2.3 BIOCHAR

La International Biochar Initiative (IBI) en el documento Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil define el biocarbón como “un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de la biomasa en un ambiente limitado de oxígeno”. El biochar es un producto poroso, rico en carbono que se obtiene por la descomposición térmica de los subproductos de actividades agroforestales, o residuos orgánicos urbanos con un aporte bajo de oxígeno y con temperaturas menores a 700° Celsius<sup>47</sup>.

El biochar se ha planteado como una tecnología de importancia ambiental, debido a su potencial para mejorar la productividad del suelo, remediar suelos contaminados y la mitigación del cambio climático<sup>48</sup>. Algunos estudios sugeridos por Lehmann y Joseph<sup>49</sup>, establecen que los componentes del biocarbón son altamente recalcitrantes en los suelos, es decir, resisten la oxidación química y biológica, extendiendo los tiempos de residencia, incluso miles de veces más, que la mayoría de la materia orgánica. En este sentido, la recalcitrancia permite que la adición del biochar al suelo, pueda actuar como un sumidero potencial de carbono, y por tanto contribuye a la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Adicionalmente, de acuerdo con Yamoah., et. al., el biochar mejora las propiedades del suelo, e incrementa la productividad de los cultivos, como componente adicional a la aplicación de biofertilizantes y microorganismos<sup>50</sup>.

No obstante, es esencial reconocer la tecnología de producción y uso del biochar y los objetivos propuestos antes de integrarlo a los procesos ambientales. Dado que, algunos tipos de contaminantes potenciales como los HAP ( Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), metales pesados, compuestos clorinados, etc. pueden estar presentes en algunos tipos de biocarbones, y pueden implicar a largo plazo consecuencias para la salud de los seres humanos y el ecosistema<sup>51</sup>.

---

<sup>46</sup> GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang; RINCÓN, Sonia., Op. cit., p.11.

<sup>47</sup>INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). Biochar Standards Document Archive. Disponible en: <[www.biochar-international.org/node/3340](http://www.biochar-international.org/node/3340)>

<sup>48</sup> AGRAFIOTIA, Evita., et. al. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis: Biochar production by sewage sludge pyrolysis. [base de datos en línea]. [citado en 10 de diciembre de 2013].

<sup>49</sup>MÉNDEZ FERNÁNDEZ, Andrea. Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje. Universidad De Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Master Oficial en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ciencias Agroforestales. Área de Edafología y Química Agrícola Valladolid. 2017. P. 52.

<sup>50</sup> ESCALANTE REBOLLEDO, Ariadna., et. al. Op. cit. p. 3.

<sup>51</sup> ESCALANTE REBOLLEDO, Ariadna., Op. cit., p 12

### 2.3.1 Características físicas y químicas del biochar.

Con respecto a sus propiedades físicas, el biocarbón es un sólido carbonoso, de color negro, con una superficie intrincada y desordenada, está compuesto por partículas de diferentes tamaños que dependen de las condiciones de pirólisis y la materia prima utilizada. El biochar está caracterizado por tener una alta porosidad, con micro, meso y macro poros, Martínez., et. al.,<sup>52</sup> establece su clasificación:

- **Macroporos:** provienen de los espacios propios de la materia original y permiten el transporte rápido de sorbatos para su posterior difusión en el volumen de micro poros, y el transporte de moléculas concentradas.
- **Microporos:** se generan en el proceso de pirólisis, la microporosidad se aumenta con mayores temperaturas y se presenta más carga reactiva. Se asocian con mayor adsorción de líquidos, sólidos y gases.

La composición química de los biocarbones tiende a variar de acuerdo con las materias primas utilizadas en su producción. Los porcentajes de nitrógeno, fósforo, carbono, oxígeno y otros elementos, pueden tener modificaciones durante la degradación térmica, y estar presentes en formas distintas a la biomasa original. Generalmente los biocarbones presentan valores de pH de neutrales a alcalinos. Se caracterizan por presentar una elevada área superficial específica. Este parámetro establece la reactividad y la capacidad del biochar para retener iones en su superficie. Se destaca también la presencia de varios elementos asociados a la fracción mineral (K, Ca, Mg, P, S, etc.) Dentro de las propiedades que posee el biochar, se encuentra su elevada capacidad de retención catiónica, alta retención de humedad y un alto grado de carbono resistente a la descomposición microbiana.

De acuerdo con Lehmann y Joseph, la producción del biochar puede conllevar al aprovechamiento energético de los bio-aceites y gases originados durante el proceso de pirólisis, reduciendo así la utilización de combustibles fósiles así mismo, el biochar se ha propuesto como una tecnología de tipo carbón-negativa, que podría ser utilizada para mejorar el incremento de la fertilidad del suelo, la producción de energía limpia, la valorización de residuos orgánicos, y la mitigación del cambio climático<sup>53</sup>.

El biochar obtenido de pirólisis a altas temperaturas se caracteriza por tener una gran área superficial y un contenido de carbono aromático, lo que puede aumentar la capacidad de adsorción (una propiedad deseable para la biorremediación). Lehmann, et. al..<sup>54</sup>, demostraron que la capacidad desorción de algunos biocarbones es comparable o incluso mayor que muchos

---

<sup>52</sup> Ibid., p 6

<sup>53</sup> OLMO PRIETO, Manuel. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. Departamento de botánica, ecología y fisiología vegetal. Córdoba, 2016, p. 157.

<sup>54</sup> GUSTAFSSON, Mattias. Pyrolysis for heat production Biochar – the primary byproduct. Suecia, 2013, p. 89. Master's Thesis in Energy Systems. Gävle University College. Faculty of engineering and sustainable development.



adsorbentes comerciales incluyendo el carbón activado. Inyang et. al.<sup>55</sup>, aseguran que estos subproductos no son costosos, ya que se producen a partir de materiales de desecho, y pueden no requerir regeneración después de haber sido utilizados como adsorbentes.

## 2.4 ADSORCIÓN

La adsorción es la adhesión física y la unión de iones y moléculas sobre la superficie de otra fase líquida o sólida<sup>56</sup>. En este sentido, Castellan, considera que es un fenómeno superficial. La sustancia que se concentra en la superficie recibe el nombre de adsorbato y la fase que la retiene es llamada adsorbente. La adsorción se ha constituido como un método relevante, en el tratamiento de aguas residuales industriales, en el cual se emplean varios materiales naturales, que aprovechan las interacciones moleculares para recolectar y remover el elemento contaminante del medio acuoso<sup>57</sup>.

La biosorción es un sistema en el que un sorbato (un ion, un átomo o una molécula) reacciona con la biomasa residual o biomaterial (biosorbente), dando lugar a la acumulación de sorbatos en la superficie del biosorbente, y por lo tanto, una disminución en la concentración de sorbato en soluciones acuosas. Este término es utilizado mayormente por algunos autores como Cañizares, en la relación de la captación de iones metálicos, que lleva a cabo una biomasa viva o muerta, a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico<sup>58</sup>.

La biosorción ocurre cuando los cationes de los metales se unen por interacciones electrostáticas a los sitios aniónicos que se encuentran en los biosorbentes. Estos sitios que sirven como centros activos para la biosorción se encuentran ubicados en los grupos de los carboxilo, hidroxilo, amino, sulfónico, que forman parte de la estructura de la mayoría de los polímeros de origen natural<sup>59</sup>.

### 2.4.1 Aplicación del biochar para el tratamiento de agua

Las propiedades específicas del biochar, incluyendo gran superficie específica, estructura porosa, grupos funcionales de superficie enriquecidos y componentes

---

<sup>55</sup> INYANG, Mandu., et. al. Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass. *Bioresource Technology*. 2012. p. 7.

<sup>56</sup> MCLAUGHLIN, Hugh. Analytical Options for Biochar Adsorption and Surface Area [en línea]. Disponible en: [http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Analytical\\_Options\\_for\\_Biochar\\_full\\_paper\\_2012.pdf](http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Analytical_Options_for_Biochar_full_paper_2012.pdf) [citado en 1 de abril de 2016]

<sup>57</sup> GARCÍA ROJAS, Norma. Análisis de la adsorción como método de pulimento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera* [en línea] 2012, 14 (Enero-Junio): [Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2017] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894007>

<sup>58</sup> CARDONA GUTIÉRREZ, Anahí Fernanda; CABAÑAS VARGAS, Dulce Diana; ZEPEDA PEDREGUERA, Alejandro. Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida-México. Ingeniería*, vol. 17, núm. 1, enero-abril, 2013, pp. 1-9.

<sup>59</sup>Ibid., p. 2.

minerales, hacen posible su uso como adsorbente adecuado para eliminar contaminantes de soluciones acuosas. Como adsorbente, el biochar tiene una estructura porosa similar al carbón activado, que es el sorbente más comúnmente empleado y eficiente para la eliminación de diversos contaminantes del agua en todo el mundo. Sin embargo, el biochar es una tecnología más eficaz y menos costosa en comparación con el carbón activado, además la producción de biochar implica menores requerimientos energéticos<sup>60</sup>.

La cinética de adsorción tiene una fuerte relación con las características físicas y químicas del biochar. Una adecuada aplicación del biochar en la remoción del contaminante requiere del conocimiento del proceso cinético. En este sentido, se incluyen los modelos cinéticos de primer y segundo orden, y el modelo de difusión intrapartícula, que de acuerdo con Reddy y Lee<sup>61</sup> proveen información que controla el proceso de adsorción relacionado con la superficie del adsorbente, la reacción química, y los mecanismos de difusión. El modelo cinético de segundo orden está basado bajo la suposición de que la etapa limitante de la velocidad, puede ser la adsorción química que implica fuerzas de valencia, mediante el intercambio de electrones entre adsorbente y adsorbato. En muchos casos, este modelo es aplicable a los procesos de remoción de metales pesados. Por ejemplo Lu et. al., estudiaron la cinética de adsorción del plomo  $Pb^{+2}$ , utilizando biochar obtenido a partir de lodos residuales, y un pH entre 2 y 5. Se encontró que esta cinética se ajustaba adecuadamente al modelo de segundo orden, el cual asume la sorción química del adsorbato en el adsorbente<sup>62</sup>.

#### **2.4.2 Factores que afectan la adsorción de contaminantes en el biochar**

La eficiencia de adsorción del biochar está influenciada por las propiedades del biochar, el tratamiento, el pH, la dosificación del adsorbente, la competitividad de los aniones, y la temperatura. A continuación, se describen los factores mencionados que interfieren en la remoción de contaminantes en soluciones acuosas.

- **Propiedades del biochar**

La temperatura pirolítica, el tiempo de residencia, la materia prima y la tecnología de conversión termoquímica tienen efectos profundos sobre las propiedades del biochar. A su vez estos factores pueden influir en la eficiencia de adsorción de diversos contaminantes. Chen et. al., analizaron que la temperatura es un

---

<sup>60</sup> GRAVALOS Ioannis., et. al., An Experimental Determination of Gross Calorific Value of Different Agroforestry Species and Bio-Based Industry Residues. Department of Biosystems Engineering, School of Agricultural Technology, Technological Educational Institute of Thessaly, Larissa, Greece. 2017. p. 12

<sup>61</sup> TAN Xiaofei., et. al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. Chemosphere. 2015. p. 16.

<sup>62</sup> Ibid., p. 7.

parámetro clave sobre las características estructurales del biochar, y tiene mayor influencia que por ejemplo las materias primas de la biomasa<sup>63</sup>.

- **Tratamiento de Eliminación de compuestos**

La desmineralización y el tratamiento de remoción de compuestos tienen un gran impacto en la composición y las características estructurales del biochar. A su vez Zhang et. al.<sup>64</sup>, indicó que el biochar tratado, puede aumentar la adsorción, específicamente la eliminación de compuestos inorgánicos, ya que estos bloquean algunas zonas de adsorción en el biochar original.

- **pH de la solución**

Es uno de los parámetros esenciales en la optimización del proceso de adsorción. La influencia del pH sobre el proceso de adsorción depende del tipo de biochar y de los contaminantes presentes. Regmi et al., Li et al; Zhang et. al., notaron que el pH, afecta no sólo a la carga superficial adsorbente, sino también al grado de ionización y especiación del adsorbato<sup>65</sup>. De esta forma, se hace notable que la adsorción de contaminantes disminuya conforme el pH es menor en la solución. Por tanto en el rango de pH más alto, los cationes metálicos pueden ser fácilmente capturados por la superficie del biochar.

- **Iones coexistentes**

La coexistencia de iones tiene una influencia significativa en el equilibrio de la capacidad de adsorción, debido a que los contaminantes complejos coexisten en el medio ambiente y tienen efectos de interacción sobre la eficiencia de adsorción. Por tanto, es necesario comprender el mecanismo de influencia de los cationes de fondo, los aniones y sus concentraciones (fuerza iónica) en solución, evaluados sobre una base individual.

- **Dosificación del adsorbente**

Aplicar una dosis óptima de biochar a la eliminación de contaminantes es crucial para su aplicación rentable. No obstante, existen variaciones en la eficiencia de remoción de acuerdo a la masa del adsorbente, en donde se ha encontrado que un aumento en su concentración, aumenta la cantidad total de sitios activos, generando mayores remociones de algunos contaminantes como los metales pesados.

- **Temperatura**

La adsorción de contaminantes por diferentes biocarbones es un proceso endotérmico. De acuerdo con Akar et. al., la capacidad de adsorción aumenta

---

<sup>63</sup> Ibid., p. 8.

<sup>64</sup> Ibid., p. 8.

<sup>65</sup> Ibid., p. 9.

con un incremento en la temperatura<sup>66</sup>. Esto se presenta, debido a que una alta temperatura proporciona suficiente energía para mejorar la captura de algunos iones en la estructura interior del biochar.

### **2.4.3 Mecanismos de adsorción de metales pesados**

El comportamiento de adsorción del biochar, es variable y se correlaciona con las propiedades de los contaminantes, a su vez la eficiencia de remoción de los mismos requiere de la identificación de los mecanismos subyacentes durante el proceso de adsorción.

Los mecanismos de adsorción dependen de las diversas propiedades del biochar, incluyendo los grupos funcionales, el área superficial específica, estructura porosa y los componentes minerales.

En cuanto a los metales pesados, los posibles mecanismos de adsorción usualmente involucran efectos integradores de varios tipos de interacciones, incluyendo atracción electrostática, intercambio iónico, adsorción física, complejación superficial y / o precipitación.

No obstante, un estudio realizado por Khare., et. al., indican que la estructura porosa, y el área superficial del biochar pueden tener menos efecto sobre la adsorción de metales pesados, que aquellos adsorbentes con grupos funcionales que contienen oxígeno<sup>67</sup>. Principalmente el Plomo, muestra una mayor adsorción en los biochar de baja temperatura que contienen grupos funcionales.

## **2.5 PODER CALORÍFICO**

La Norma Estándar ASTM 5865 define el poder calorífico como “el calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de una sustancia en determinadas condiciones”<sup>68</sup>

El poder calorífico representa la cantidad de energía térmica liberada durante la combustión completa de la masa unitaria de biomasa, y se expresa generalmente en kilocaloría, Kilojoule, megajoule o BTU (British Thermal Unites) por unidades de masa del combustible. El valor calorífico es una característica física muy importante de todos los combustibles, y la determinación precisa del mismo es de gran relevancia como base de los requerimientos energéticos en todo el mundo. A su vez, es un indicador representativo del potencial energético de un combustible<sup>69</sup>.

---

<sup>66</sup> ROSAS CASTOR, José Martín. Aplicación De Residuos Agrícolas Para El Tratamiento De Agua Contaminada Con Colorantes. Universidad Autónoma De Nuevo León Facultad De Ciencias Químicas. Trabajo de grado (MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientación en Procesos Sustentables). Nuevo León. 2012. p. 113.

<sup>67</sup> TAN Xiaofei., et. al. Op. cit. p. 11.

<sup>68</sup> Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. ASTM D5865 – 13 (2013). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en:  
<<http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/200882712463.pdf> >

<sup>69</sup> DEVASAHAYAM, Sheila; DOWLING, Kim; MAHAPATRA, Manoj. Sustainability in the mineral and energy sectors. 2016. Disponible en:  
<<https://books.google.com.co/books?id=KCUNDgAAQBAJ&pg=PA504&lpg= substance> >.

El valor calorífico se puede valorar bajo dos expresiones, el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior, el primero, indica la cantidad de calor que puede proporcionar el combustible cuando toda el agua en los productos permanece como vapor, mientras que el poder calorífico superior (PCS), determinado experimentalmente mediante calorímetro, refleja el calor que puede liberar el combustible cuando toda el agua presente en los productos se condensa<sup>70</sup>.

La sustitución de fuentes de energía primaria como los combustibles fósiles permiten la inclusión de diferentes recursos biomásicos en procesos termoquímicos en los que se pueda valorar su potencial energético y su poder calorífico, y a su vez conlleve una reducción de los impactos ambientales entorno a las emisiones de gases contaminantes. La recuperación energética de los lodos generados en los procesos de tratamiento de las aguas residuales también se ha constituido como una alternativa de aprovechamiento, con relación al manejo y disposición, ya generalmente estos residuos tienen una aplicación asociada con el mejoramiento de los suelos<sup>71</sup>. Romdhana et. al., afirma que el contenido energético de los biosólidos es similar al del carbono, además se convierte en un combustible alternativo, pues conlleva una disminución de emisión de dióxido de carbono. No obstante, existen algunas implicaciones en el uso de los biosólidos asociadas a los requerimientos de temperatura y los equipos utilizados<sup>72</sup>.

### 2.5.1 El poder calorífico y su relación con algunas variables fisicoquímicas

Al considerar diferentes biomásas en los procesos energéticos de debe tener en cuenta las variables que afectan la capacidad calorífica como la humedad, el contenido de cenizas y el contenido de carbono fijo.

Tabla 3. Clasificación de la ASTM para carbones.

CLASE	C % ( en peso)	MATERIA VOLÁTIL (%)	PCS (kcal/kg)
<b>Antracita</b>	86-98	2-14	<8000
<b>Bituminoso</b>	69-86	14-31	5000-9000
<b>Lignito</b>	<69	>31	<5000

Fuente: URIEN PINEDO, Andrea.

De acuerdo con la clasificación presentada en la tabla, los valores caloríficos superiores de los carbones están asociados a las diferencias en la relación del contenido de carbono fijo y materia volátil, siendo la antracita el carbón de más alto rango y con mayor poder calorífico.

<sup>70</sup> NAVARRETE CORDOVA, Mario Alejandro. Estudio de la utilización como combustibles alternativo y plan de disposición final de los neumáticos desechables en la ciudad de Riobamba. Riobamba. Trabajo de grado (Ingeniero en Biotecnología Ambiental). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de Ciencias químicas. Ecuador, 2009, p 133.

<sup>71</sup>Jaime Quesada Kimzey. La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *En: Tecnología en Marcha*. Marzo 2012. Vol. 25, N° 5, p. 14-21.

<sup>72</sup> CANO LONDOÑO, Natalia Andrea., Op. cit., p.27.

El valor calorífico es un indicador significativo de la calidad de la biomasa, que depende de la composición elemental, contenido de humedad y el contenido de cenizas. Los valores caloríficos brutos de las diferentes especies agroforestales y los residuos industriales varían entre 14,3 - 25,4 MJ·kg<sup>-1</sup>. Las diferencias del contenido energético se deben principalmente a diferentes contenidos de carbono, contenido de humedad, el material no combustible o el sitio experimental<sup>73</sup>.

La determinación del poder calorífico superior implica que una parte del calor liberado durante las reacciones químicas se absorba a través de la evaporación. Esto conlleva a que se genere una disminución del poder calorífico inferior conforme el contenido de humedad de la biomasa aumenta. En este sentido, el contenido de materia combustible también es más bajo, en la medida que el porcentaje de agua es más alto.

### **2.5.2 Poder calorífico de los subproductos de la pirólisis**

De acuerdo con Amonette; et. al., se considera que la pirólisis transforma el 50% del carbono del material inicial en biochar y 50% del carbono restante en bioaceites y syngas, que pueden utilizarse como sustitutos de los combustibles fósiles para obtener una energía con una eficiencia media del 62%<sup>74</sup>. En este sentido, estos productos obtenidos a partir de la biomasa, presentan un contenido energético de gran interés para la generación de bioenergía. Adicionalmente, Bridgwater afirma que pueden incorporarse nuevamente para satisfacer las necesidades energéticas del proceso de pirólisis<sup>75</sup>.

La fracción líquida y gaseosa producto de la pirólisis pueden emplearse como combustibles para la producción integrada de calor y electricidad, otra opción es que puedan ser procesados para incluirse como agregados de varios combustibles y productos químicos en la mayoría de los casos, estos deben ser tratados previamente antes de su utilización. Con relación al sólido, Okoroigwe y Saffron establecen que el poder calorífico del biochar expresa su potencial energético, para un posterior uso como combustible. Además, tiene una relación directamente proporcional con el contenido de carbono fijo, a mayor contenido de este, mayor es el poder calorífico del biochar<sup>76</sup>.

Su valor calorífico es equivalente que la mayor parte de los carbones bituminosos, con la ventaja de que las emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> que se producen en su utilización como combustible son mucho menores que las producidas por los carbones minerales convencionales. Una investigación realizada por Urien, concluye que un incremento de la temperatura de pirólisis, mejora la calidad de

---

<sup>73</sup> GRAVALOS Ioannis., et. al., p. 1.

<sup>74</sup> OLMO PRIETO, Manuel., Op. cit. p.37.

<sup>75</sup> MIRANDA, Rosa., et. al. Characterization of Pyrolysis Products. Obtained During the Preparation. En: Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon-Characterization Techniques and Applications in the 78 Wastewater Treatment. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

<sup>76</sup> GÓMEZ, Leonardo Alonso., et. al., Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. En: Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 19 (2): 341 – 349. 2016.

los biocarbones al reducirse la cantidad de compuestos volátiles y aumenta la concentración de carbono y el poder calorífico<sup>77</sup>.

La producción de energía a partir de la pirólisis genera emisiones de CO más bajas, al igual que menores partículas de smog, comparativamente con algunos procesos de combustión de residuos de madera. No obstante, existen falencias asociadas con el conocimiento de los subproductos de esta tecnología térmica, y los mercados para su desarrollo. Desde el punto de vista económico, la aplicación de este proceso termoquímico está determinada por la disponibilidad de los residuos biomásicos, los mercados posibles, el tipo de pirólisis y los costos del proceso<sup>78</sup>.

Con relación al desempeño ambiental de los biocombustibles, la Agencia internacional de Energía, plantea la reducción en las emisiones de gases contaminantes, y minimizar la dependencia por los combustibles fósiles<sup>79</sup>.

## **2.6 DRENAJE ÁCIDO DE MINAS**

Las actividades asociadas a la explotación y extracción de minerales, para la obtención de elementos como el oro, el cobre, el hierro, el carbón, entre otros, han tenido sin duda, un papel relevante en el desarrollo económico mundial. A pesar de su aporte en el sector productivo, también conllevan la generación de impactos ambientales negativos relacionados con los drenajes ácidos de mina. El proceso de formación de los drenajes ácidos, inicia cuando los minerales sulfurados como la piritita se exponen a los efectos del oxígeno y el agua. Esto sucede cuando se hace remoción de material como apertura de tajos, túneles, se acopian estériles de mina, se disponen los relaves sin ningún tipo de control civil<sup>80</sup>.

No obstante, De Rosa y Lyon<sup>81</sup> establecen que los procesos de oxidación de los sulfuros también se producen de forma natural, cuando los yacimientos que contienen estos minerales, son expuestos a la acción del oxígeno y el agua, a estos se les denomina drenaje ácido de roca ARD. Sin embargo, en el drenaje ácido de mina DAM, se da un proceso magnificado, el cual se ve afectado por la rápida acción bacteriana (oxidación bacteriana).

### **2.6.1 Impactos ambientales del drenaje ácido de minas**

El drenaje ácido de mina sin duda genera diversos impactos ambientales, debido a que son efluentes que conllevan a la contaminación de fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos porque presentan valores bajos de pH (1,5-6), por tanto aportan una gran cantidad de acidez debida a la formación

---

<sup>77</sup> URIEN PINEDO, Andrea. Op. cit. p.47.

<sup>78</sup> GUSTAFSSON, Mattias. Op. cit., p.82.

<sup>79</sup> MOBOLAJI B. Shemfe, SAI Gu, PANNEERSELVAM Ranganathan. Techno-economic performance analysis of biofuel production and miniature electric power generation from biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading.

<sup>80</sup> CHAPARRO LEAL, Laura Teresa. Drenajes Ácidos de Mina. Formación y Manejo En: Revista ESAICA Sección Ingeniería Ambiental. Québec-Canadá. Vol.1 n°1, junio 2015, p. 53-57.

<sup>81</sup> Drenaje Ácido de la Minería Minería y Contaminación de Agua en la Columbia Británica, Canadá. Disponible en: <[https://miningwatch.ca/sites/default/files/amd\\_esp.pdf](https://miningwatch.ca/sites/default/files/amd_esp.pdf)>

de ácido sulfúrico y elevadas concentraciones de metales pesados como el cobre, plomo, arsénico, entre otros; que son solubles a valores de pH bajos<sup>82</sup>.

Benner., et. al., afirman que, uno de los efectos más importantes con relación al DAM es la contaminación de cuerpos de agua con altas concentraciones de hierro, que provoca la coloración roja o naranja y el alto contenido de sulfatos, superior a los 2500 mg/l<sup>83</sup>.

Debido a su complejidad, el impacto de las aguas residuales mineras es difícil de predecir, especialmente en los sistemas ribereños. Sin embargo los efectos producidos pueden clasificarse de acuerdo con la toxicidad de los metales, procesos de sedimentación, acidez, y la salinización. El ácido generado, por la exposición de los materiales a los elementos oxidantes facilita la lixiviación de componentes tóxicos, estos, a su vez son la fuente de contaminación más importante de los impactos a la calidad del agua relacionados con la minería metálica. En pequeñas cantidades, los metales pueden ser tóxicos para la fauna silvestre; al transportarse en el agua, pueden alcanzar grandes distancias y contaminar arroyos y aguas subterráneas. Los impactos generados a la vida acuática, afectan el crecimiento y la capacidad de reproducirse, e incluso pueden llevar a la mortandad inmediata de los peces<sup>84</sup>.

De acuerdo con Chaparro, una de las características más importantes asociadas a los impactos de los DAM, radica en que una vez han sido generados, el proceso de formación es cíclico e irreversible y puede tardar incluso décadas hasta tanto no sea eliminado uno de los principales factores que lo causan<sup>85</sup>.

Beverly afirma que el drenaje ácido constituye uno de los mayores pasivos ambientales asociados a las actividades mineras, especialmente para los cuerpos de agua<sup>86</sup>. En este sentido, se debe plantear un manejo integral de los drenajes ácidos de mina, para identificar su formación y generar alternativas de tratamiento adecuado para mitigar las consecuencias negativas a los ecosistemas. Algunas estrategias de remediación implementan materiales usados como adsorbentes para la remoción de diferentes especies metálicas.

En el agua, las sales solubles de los metales pesados como el plomo, cadmio y mercurio son tóxicos y acumulables por los organismos que los adsorben los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por alguno de sus eslabones. Por su gran toxicidad, se debe reducir la concentración en las aguas residuales industriales antes de su vertido o de cualquier tratamiento biológico, para evitar la afectación de los metales pesados en la fauna y flora. En altas concentraciones, estos metales pesados también pueden afectar a la salud humana. Con relación a la protección del recurso

---

<sup>82</sup> CHAPARRO LEAL, Laura Teresa. Op. cit., p.1.

<sup>83</sup> BENNER, S., et al., Geochemistry of a permeable reactive barrier for metals and acid mine drainage. Environmental Technology. 1999. pp 2793-2799

<sup>84</sup> Overview of Mining and its Impacts. Guidebook for Evaluating Mining Project EIA. Disponible en: <<https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Chapter1.pdf>>

<sup>85</sup> CHAPARRO LEAL, Laura Teresa. Op. cit., p.1.

<sup>86</sup> Drenaje Ácido de la Minería Minería y Contaminación de Agua en la Columbia Británica, Canadá. Op. cit. p. 7.



hídrico la Normativa Ambiental Colombiana, a través de la Resolución 0631 de 2015, establece los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En cuanto a los efluentes provenientes de actividades mineras, se fijan concentraciones máximas permisibles para metales pesados. El valor estimado para el cadmio en vertimientos a cuerpos de agua, debe estar por debajo de 0.05 mg/L<sup>87</sup>.

Los efectos de la contaminación por cadmio del subsuelo y de las aguas subterráneas, permanecen en el tiempo de forma aún no determinada<sup>88</sup>.

### **2.6.2 Investigaciones referentes a la remoción de metales pesados en drenajes mineros usando materiales adsorbentes**

Varios recursos biomásicos y los productos obtenidos al introducirlos en procesos termoquímicos, pueden funcionar eficazmente para reducir la concentración de metales pesados generalmente presentes en aguas mineras. Sus características de superficie físicas y químicas favorables, su disponibilidad, y su bajo coste, exhiben un gran potencial para eliminar diversos contaminantes del agua.

Un estudio realizado por Vera et. al., asociado a la remoción de metales pesados en aguas residuales mineras, propuso el bagazo de caña como biosorbente. A su vez, se analizó el efecto del pH de la solución, el tiempo de contacto, la concentración de la especie metálica, y la cinética de biosorción, sobre las tasas de remoción de cada metal. Con relación al cadmio, el mejor porcentaje de remoción fue de 77.81% para un pH de 6. Adicionalmente, se observó que tanto para el plomo como para el cadmio, a medida que se incrementaba la concentración del metal aumentaba la cantidad de metal adsorbido por gramos de adsorbente<sup>89</sup>.

De acuerdo con Cantrell., et. al.,<sup>90</sup> el mecanismo de adsorción de metales pesados mediante el uso del biochar, comprende interacciones electrostáticas a través de los grupos funcionales de la superficie del biochar. Un estudio realizado por Jun, para analizar el porcentaje de remoción de varios metales pesados utilizando biochar, y el resultante al inmovilizarlo con ácido de alginato, evaluó distintas variables como el pH, la temperatura y el metal pesado (Pb, Cd y Cu). La capacidad de adsorción era afectada por el biosorbente, y el resultado indicaba que se obtenían mejores adiciones con un pH de 6 para los tres

---

<sup>87</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (17 de Marzo de 2015). Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2015. p. 62.

<sup>88</sup> BLANCO HERNÁNDEZ, Ángel Luis., et. al., Estudio de los niveles de plomo, cadmio, zinc y arsénico, en aguas de la provincia de Salamanca. Rev Esp Salud Pública 1998, Val. 73. N.º 1

<sup>89</sup> VERA Luisa., et. al., Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. Centro de estudios ambientales. Universidad de Cuenca. Facultad de Química. Ecuador. AFINIDAD LXXIII, 573, Enero - Marzo 2016.

<sup>90</sup> CANTRELL, Keri B., et. al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. Bioresource Technology 2012. p. 10.

metales, igualmente un incremento en la temperatura mejoraba la adsorción en el biochar inmovilizado.

Una investigación realizada por Murat et. al., evaluó la adsorción de metales pesados en soluciones usando biochar, producto de la pirólisis, a su vez se pudo concluir que la capacidad de adsorción aumenta a medida que se aumentan las concentraciones iniciales y el tiempo de contacto tanto para el níquel como para el cobalto, y de igual forma una mayor temperatura genera mayores sitios de superficie activa para la adsorción en el adsorbente<sup>91</sup>.

Lu et. al., propone que los grupos funcionales juegan un papel importante en la adsorción de Pb a través del biochar derivado de lodo, a través del intercambio del metal con K y Na debido a la complejación electrostática de la esfera externa, la superficie de complejación con los grupos funcionales carboxilo e hidroxilo y la complejación interior con los grupos hidroxilo libres<sup>92</sup>.

## **2.7 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS**

A partir de la aplicación de técnicas analíticas para identificar las características fisicoquímicas de los diferentes materiales y residuos, se pueden identificar sus componentes y establecer las mejores alternativas de uso y manejo. La determinación de parámetros fisicoquímicos y propiedades combustibles involucra realizar el análisis próximo, el análisis elemental, y el poder calorífico. Con el análisis elemental, se determina el contenido de compuestos simples que se gasifican y que aportan energía en las reacciones de combustión<sup>93</sup>.

### **2.7.1 Análisis próximo:**

El análisis próximo establece los procedimientos para la determinación de los contenidos de humedad, cenizas y materia volátil en diferentes materias, residuos agrícolas y forestales, residuos sólidos, entre otros. Con relación a la conversión térmica de la biomasa, el análisis próximo o inmediato es uno de los métodos de caracterización más importantes, que permite describir el comportamiento del material como combustible. De esta forma, un incremento en el porcentaje de humedad, produce un bajo rendimiento en la combustión, mientras que una alta relación de materia volátil y carbono fijo están asociadas con la reactividad del combustible. En cuanto a las cenizas, están pueden influir en los costos de transporte y gestión final<sup>94</sup>.

---

<sup>91</sup> MURAT, Kilic., et. al. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by bio-char, a by-product of pyrolysis. Department of Chemical Engineering. Faculty of Engineering. Anadolu University. Volumen 283. p. 856-862. 2013.

<sup>92</sup> INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). Op. cit.

<sup>93</sup> Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Anexo B. Disponible en: <[http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo\\_B\\_Muestreo\\_caracterizaci%C3%B3n\\_biomasa\\_residual.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo_B_Muestreo_caracterizaci%C3%B3n_biomasa_residual.pdf)>

<sup>94</sup> PIZARRO Consuelo., et. al., Biomass proximate analysis using thermogravimetry. Bioresource Technology. 2013. p.4.

- **Humedad.**

Es una medida de la cantidad de agua y otros componentes volatilizados a 105°C Celsius presentes en una muestra sobre el peso total. La humedad es una variable fundamental en cualquier muestra de biomasa y tiene un gran efecto en el valor energético de la misma y en los procesos de combustión. La determinación del contenido total de sólidos permite la corrección de las muestras de biomasa a una masa sólida secada al horno que es constante para una muestra particular<sup>95</sup>.

- **Materia volátil.**

Este método cuantifica el contenido de productos gaseosos; liberados a través del vapor de agua a elevadas temperaturas. El contenido volátil está dado por la pérdida en peso debido a la degradación térmica cuando se calienta la biomasa bajo condiciones controladas. En este sentido, el aumento de la temperatura del combustible genera tanto partículas residuales, como una fracción gaseosa que se emite en material particulado fuera del crisol. La determinación de este parámetro es esencial para indicar el rendimiento de un combustible en el proceso de carbonización, las características de combustión, así como la longitud de la llama en los procesos de incineración<sup>96</sup>.

- **Cenizas:**

Este método expresa el porcentaje de residuos que queda después de la oxidación a temperaturas entre 550°C Celsius hasta 600°C Celsius. El contenido de cenizas es una medida del contenido mineral y el material inorgánico de la biomasa y se utiliza junto con otros procedimientos para determinar la composición total de las muestras de biomasa. No obstante, la ceniza no es combustible, por tanto, afecta negativamente el valor calorífico de un material. El valor final del contenido de cenizas de un combustible depende de la composición inicial del contenido inorgánico de la biomasa y temperatura<sup>97</sup>.

- **Carbono Fijo.**

Es la fracción de carbono residual que permanece luego de retirar de la muestra, la humedad, las cenizas y el material volátil. En procesos de combustión, el carbono fijo sigue quemándose lentamente después de que se desprenden los volátiles, por tanto, es el compuesto que no destila cuando se calienta un

---

<sup>95</sup> Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. ASTM E1756 – 08(2015). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en: <<ftp://185.72.26.245/Astm/1/03/E/ASTM%20E%201756-08.pdf>>

<sup>96</sup> Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM D3175 – 11(2011). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en: <<http://www.razi-foundation.com/Portals/0/Files/standards/ASTM%20D%203175%202011.pdf?ver=1395-08-22-190150-283>>

<sup>97</sup> SLUITER, A. Determination of ash in biomass. A National Laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency y Renewable Energy. Technical Report. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42622.pdf>. 2008.

combustible. El contenido de materia volátil y de carbono fijo son los parámetros influyentes en la transformación energética de la biomasa<sup>98</sup>.

### **2.7.2 Análisis elemental**

Es una técnica que expresa el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, presente en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica tanto sólidas como líquidas.

Los contenidos de azufre y nitrógeno son fundamentales en la valorización energética de los residuos biomásicos, debido a que al ser sometidos a procesos de conversión termoquímica como la combustión, la gasificación, y la pirólisis, se pueden generar emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno que son causantes de la lluvia ácida y el smog fotoquímico<sup>99</sup>. En cuanto al carbono, es un referente para estimar la composición de los gases en procesos de combustión, asociadas a las emisiones de dióxido de carbono (gas de efecto invernadero).

### **2.7.3 Poder calorífico**

El análisis del poder calorífico constituye un método de caracterización térmico que permite reconocer las cualidades como combustible de diferentes materiales y su eficiencia en procesos energéticos. El poder calorífico de una sustancia se obtiene experimentalmente a través del poder calorífico Superior, el cual se determina mediante bomba calorimétrica mediante condiciones adiabáticas, o calorímetro de bomba de oxígeno isoparabólica controlado por un microprocesador para realizar correcciones de temperaturas y establece previamente cuando el calorímetro está en equilibrio y después de la ignición.

El poder calorífico se establece como una medida para estimar el contenido calorífico de un material frente a su contenido de azufre, y en consecuencia determinar la factibilidad y el cumplimiento de los requisitos asociados a los combustibles industriales. Adicionalmente, evalúa la efectividad en los procesos y se requiere para la clasificación de diferentes carbones<sup>100</sup>.

Existe una correlación del poder calorífico con los valores de la composición química el análisis próximo y el análisis elemental. En cuanto a este último, los contenidos de (C, H, N, S) pueden emplearse para la determinación del poder calorífico neto mediante correlaciones empíricas.

### **2.7.4 Análisis textural y químico del biochar**

El estudio morfológico de las partículas del biochar se realiza a través del análisis MEB, el cual evalúa las variaciones estructurales en el biochar derivado de tratamientos térmicos, y las imágenes permiten obtener detalles precisos del poro. Las propiedades físicas son determinantes para estimar la capacidad

---

<sup>98</sup> Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia. Op. cit. p. 11.

<sup>99</sup> COLOMER F.J., et. al. Posibilidades de valorización de diferentes lodos de depuradoras. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Badajoz. (Ingeniería de Residuos). 2009. p. 12.

<sup>100</sup> Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM D5865-13. ASTM VOL-0506. 2013. Disponible en: <<http://www.normadoc.com/spanish/astm-d5865-13.html>>

calorífica de los combustibles sólidos, y los sitios activos identifican aplicaciones adsorbentes. La composición química mediante el análisis de Difracción de Rayos X (XRD), determina los compuestos en fase cristalina.

### **2.7.5 Microscopia electrónica de barrido**

La microscopia electrónica de barrido es una técnica de análisis superficial que permite la observación y la caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos, aportando información morfológica del material analizado. su funcionamiento consiste en la interacción de un haz primario de electrones con la superficie de estudio, este haz es muy fino, estable e intenso, el cual explora la superficie de la muestra y origina señales diversas, que permiten obtener información morfológica, estructural y analítica. El microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de un objeto, y explora la superficie de la imagen punto por punto con tamaños desde centímetros hasta muestras del orden de nanómetros. Tiene grandes aplicaciones para la caracterización de sólidos carbonosos, para la observación de su morfología y sus principales estructuras<sup>101</sup>.

### **2.7.6 Difracción de rayos X (XRD)**

La difracción de rayos X es una técnica empleada para identificar cualitativamente los compuestos cristalinos presentes en una muestra. Permite no solo diferenciar las estructuras del carbono entre sí, sino también determinar el grado en que una determinada forma de carbono se aproxima a una estructura gráfica. En dicha técnica, se hace incidir un haz de luz, con una longitud de onda comparable a las distancias interatómicas, sobre la muestra cristalina cuya estructura se pretende determinar. Como resultado de esta interacción, los rayos X se dispersan por los átomos produciendo interferencias que pueden ser destructivas o constructivas. De esta forma se produce un diagrama específico para cada sustancia cristalina presente en la muestra, que permite determinar su composición química y su identidad<sup>102</sup>.

## **2.8 ANÁLISIS QUÍMICO DE ELEMENTOS METÁLICOS EN MUESTRAS DE AGUA.**

### **2.8.1 Espectrofotometría de absorción atómica**

La Espectrofotometría de Absorción Atómica es una técnica diseñada para determinar cantidades de elementos químicos presentes en muestras ambientales midiendo la radiación absorbida por el elemento químico de interés. La radiación emitida hacia la muestra permite detectar longitudes de onda determinadas, a través de la absorción de luz visible o ultravioleta de los átomos en estado fundamental, haciendo transiciones a niveles de energía superior. Los métodos de absorción atómica miden la cantidad de energía en forma de fotones

---

<sup>101</sup> SALAS CEPEDA, Rodolfo. Estudio de Materiales Nanométricos con Microscopio Electrónico de Barrido SEM. Trabajo de Grado (Maestría en Nanotecnología). Centro de investigación en materiales avanzados. Chihuahua. Chih. 2014.

<sup>102</sup>Técnicas de caracterización. Conceptos generales. Disponible en: <[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV\\_T%C3%A9cnicas\\_de\\_caracterizaci%C3%B3n.\\_Conceptos\\_generales.pdf?sequence=8](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV_T%C3%A9cnicas_de_caracterizaci%C3%B3n._Conceptos_generales.pdf?sequence=8)>.

de luz que son absorbidos por la muestra. Un detector mide las longitudes de onda de la luz transmitida por la muestra, y las compara con las longitudes de onda que originalmente pasaron a través de la muestra. Posteriormente, un procesador de señal, establece los valores de absorción que aparecen en la lectura como picos de absorción de energía en longitudes de onda discretas.

La absorción atómica con llama o mediante horno de grafito, son las técnicas empleadas para determinar concentraciones de metales. El aumento en la acumulación de diferentes especies metálicas en los ecosistemas por las actividades antropogénicas, genera diversos efectos adversos a los sistemas vivos y a la salud humana, por ende, se ha generado una especial atención en el estudio de la concentración de elementos tóxicos en el ambiente, mediante la aplicación de la absorción atómica<sup>103</sup>.

## **2.9 ASPECTOS GENERALES DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE SOTAQUIRÁ.**

Los biosólidos utilizados en la presente investigación, se obtuvieron de la Planta de Tratamiento de aguas residuales del Municipio de Sotaquirá, ubicado en el Departamento de Boyacá. Esta unidad depurativa capta las aguas residuales domésticas del Municipio, y cuenta con tres líneas de tratamiento en paralelo.

La primera línea de aguas, consta de un reactor UASB, un sedimentador y un tanque Imhoff. La siguiente línea, está compuesta por dos lagunas, una facultativa y otra de maduración, y constituyen el tratamiento secundario. Finalmente, los humedales de flujo superficial y de flujo subsuperficial dan lugar a los procesos complementarios del tratamiento del agua residual<sup>104</sup>.

Figura 1. Lechos de secado PTAR Sotaquirá



Fuente: Autores

<sup>103</sup> GARCÍA, R; BÁEZ P. Atomic Absorption Spectrometry (AAS). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México.

<sup>104</sup> PÉREZ, Andrea. Efecto de la formación del manto de lodos sobre el comportamiento hidrodinámico de un reactor UASB a escala real. Estudio de caso: Sotaquirá, Colombia. 2014.

La línea de lodos de la PTAR de Sotaquirá, trata los subproductos derivados de la línea de aguas, la cual a su vez está compuesta por un digestor de lodos, para estabilizar el material resultante de los procesos de tratamiento y controlar los efectos negativos por su exposición al ambiente, posteriormente, estos subproductos se disponen en lechos de secado para minimizar el contenido de humedad, con capas de 20 a 30 cm de espesor, permitiendo el secado natural. Como alternativa de aprovechamiento, una parte de los biosólidos es destinada como abono, el cual es recuperado por campesinos del municipio para optimizar la producción de sus cultivos.

El biosólido recolectado de la PTAR de Sotaquirá contiene aproximadamente un 90% de humedad, la cual fue determinada de acuerdo con la Norma ASTM E1756-08. Para facilitar el manejo y la ejecución de los análisis de caracterización del material, los biosólidos se sometieron a procesos de secado en un Horno marca Terrígeno, del laboratorio de Ingeniería ambiental, llevándolos a una temperatura de 105° Celsius, durante aproximadamente 3 días. El biosólido obtenido con una humedad inferior al 5%, fue empleado para realizar los posteriores análisis fisicoquímicos y térmicos.

Figura 2. Biosólidos PTAR Sotaquirá



Fuente: Autores.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO

La composición del biosólido es variable y depende del tipo de efluente del cual procede, del tratamiento empleado en la descontaminación del agua, y de los procesos de estabilización a los que son sometidos los lodos residuales. Por tanto, es fundamental identificar sus características fisicoquímicas y térmicas, y valorar los posibles usos de aprovechamiento.

El biosólido de la PTAR de Sotaquirá tiene un contenido de humedad inicial del 88.6%, el cual se determinó de acuerdo con el procedimiento indicado por la Norma estándar ASTM E1756-08 Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass, por lo que fue sometido a procesos de secado natural, y mediante horno eléctrico para facilitar su manipulación y el desarrollo de los análisis posteriores. El secado se realizó a una temperatura de 105° Celsius durante aproximadamente cinco días en un horno Termolyne 1300 del Laboratorio del Ingeniería Ambiental de la UPTC. El Biosólido con una humedad promedio de 3.5% fue empleado para realizar los análisis de caracterización, poder calorífico, y degradación termoquímica.

Posterior al secado de las muestras del biosólido, se realizaron procedimientos de trituración y tamizaje, tomando como referencia el método A, de la Norma ASTM E1757-01 Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis, de la American Society for Testing and Materials (ASTM). La metodología empleada, busca generar materiales biomásicos mas uniformes en tamaño, para la aplicación de los análisis de caracterización<sup>105</sup>.

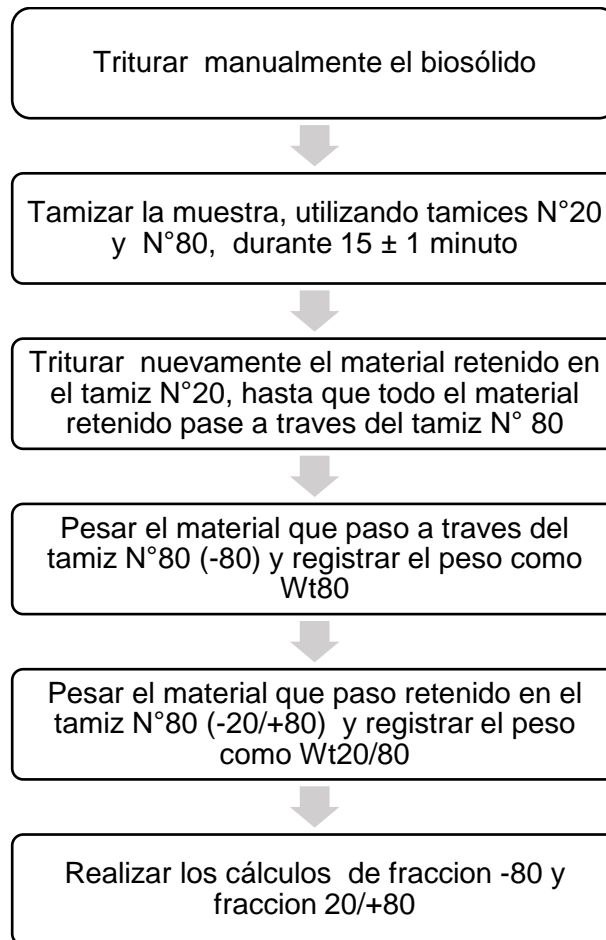
Los procesos de preparación de las muestras del biosólido se desarrollaron en el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

---

<sup>105</sup> Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. ASTM E1757 – 01 (2015).  
ASTM INTERNATIONAL. Disponible en:  
<<http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/200882712463.pdf><https://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42620.pdf> >



Figura 3. Procedimientos de preparación del material para el análisis composicional



Fuente: (Adaptado ASTM E1757-01)

Los porcentajes de las muestras que corresponden a la fracción (-20/+80) y a la fracción (-80) se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$Fracción \left( \frac{20}{80} \% \right) = \frac{Wt \frac{20}{80}}{\frac{Wt20}{80} + Wt80} * 100 \quad (Ec. 1)$$

$$Fracción (80\%) = 100 - Fracción \left( \frac{20}{80} \% \right) \quad (Ec. 2)$$

Donde Wt20/80 es el peso del material que paso el Tamiz 20 y retenido en el Tamiz 80 en gramos y Wt80 es el peso del material que paso el Tamiz 20 y el Tamiz 80 en gramos.

### **3.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN**

Los métodos aplicados para la caracterización de los biosólidos incluyen el análisis próximo, análisis elemental y el poder calorífico. Se toma como base la Norma ASTM de la American Society for Testing and Materials asociada a la biomasa y a los combustibles sólidos.

#### **3.2.1 Análisis próximo**

Cada uno de los procesos aplicados para la determinación de humedad, cenizas y materia volátil fueron implementados de acuerdo con la Norma estándar American Society for Testing and Materials (ASTM). El porcentaje de humedad del biosólido, fue determinado según la Norma ASTM E 1746-08. La cantidad de material volátil se estimó, tomando como referencia la norma ASTM E872-82. La determinación del contenido de cenizas en el material residual, se realizó con base en la Norma ASTM E1755-01 para materiales biomásicos.

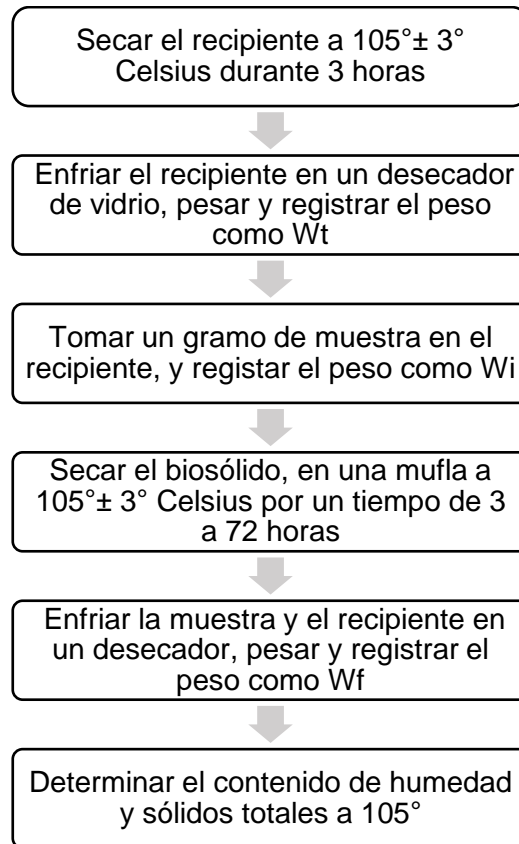
Con base en los contenidos de humedad, cenizas y materia volátil se determina por diferencia los valores de carbono fijo (CF).

- **Humedad.**

Para la determinación del contenido de humedad se emplea la norma estándar ASTM E1756-08 Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass, la cual permite determinar la cantidad de sólidos totales que quedan después de calentar la muestra, a una temperatura aproximada de 105°C Celsius con peso constante.

El proceso de calentamiento de las muestras se realiza en un Horno Thermolyne 1300, con una capacidad de regulación de temperatura de 105°C Celsius  $\pm$  5°C Celsius

Figura 4. Procedimiento para la determinación del contenido de humedad



Fuente: (Adaptado ASTM E1756-08)

El contenido de humedad y sólidos totales se estima de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\%T_{105} = \frac{Wf - Wt}{Wi - Wt} * 100 \quad (Ec. 3)$$

$$\%B_{105} = 100 - \%T_{105} \quad (Ec. 4)$$

Donde  $\%T_{105}$  es el porcentaje de Sólidos totales en la muestra, secos a 105 °C Celsius;  $\%B_{105}$  es el contenido de humedad en la muestra, determinada a 105° Celsius;  $Wt$  es el peso en gramos del recipiente con tapa;  $Wi$  es el peso inicial, en gramos de la muestra y el recipiente con tapa y  $Wf$  es el peso final en gramos del recipiente y el material residual.

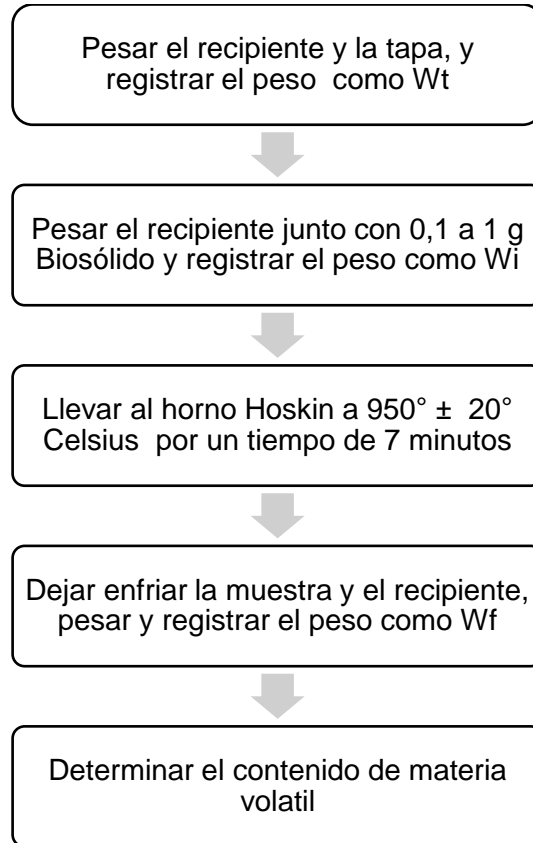
- **Materia volátil.**

El contenido del material volátil en el biosólido se estima de acuerdo con los procedimientos descritos por la Norma estándar (ASTM E872-82) Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels.

Teniendo en cuenta lo establecido por el método estándar, la pérdida en peso de la muestra, generada por el incremento de la temperatura, debe ser corregida

por el contenido de humedad, previamente determinado en el método ASTM E1756-08, para establecer el contenido de materia volátil.

Figura 5. Procedimiento para la determinación del contenido de Materia volátil



Fuente: (Adaptado ASTM E872-82)

El porcentaje de materia volátil es calculado mediante las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{(W_i - W_f)}{(W_i - W_c)} * 100 \quad (Ec. 5)$$

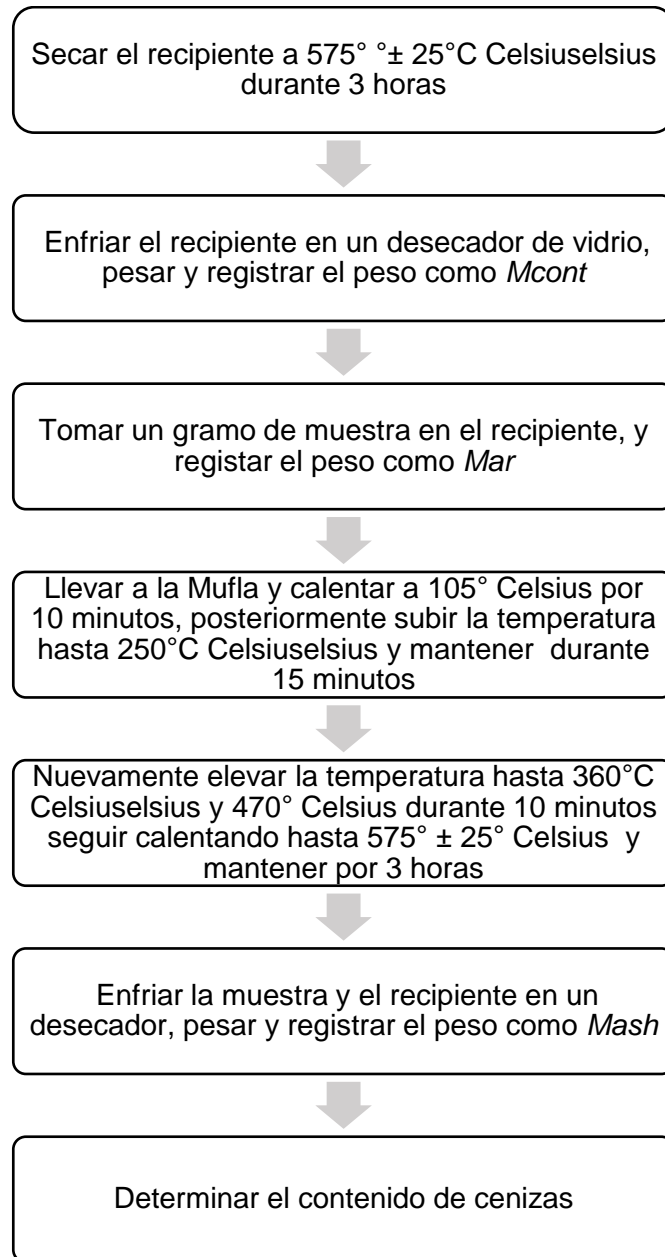
$$MV = A - \%B_{105} \quad (Ec. 6)$$

Donde A es el porcentaje de pérdida de peso de la muestra, B<sub>105</sub> es el porcentaje de humedad de la muestra, Wt es el peso en gramos del crisol y la tapa, Wi es el peso inicial, en gramos de la muestra y el recipiente, Wf es el peso final, en gramos de la muestra y el recipiente, y MV es el contenido de material volátil.

- **Cenizas.**

El contenido de cenizas en el biosólido se determina con base en la Norma estándar (ASTM E1755-01) Standard Test Method for Ash in Biomass. Dados los procedimientos descritos para establecer el porcentaje de cenizas en la muestra, se correlaciona con el contenido de humedad basado en la norma ASTM E1756-08.

Figura 6. Procedimiento para la determinación del contenido de cenizas



Fuente: (Adaptado ASTM E1755-01)

La determinación del contenido de cenizas se realiza con base en las siguientes ecuaciones:

$$Ms = (Mar - Mcont) * \frac{\%T_{105}}{100} \quad (Ec. 7)$$

$$Cenizas = \frac{Mash - Mcont}{Ms} * 100 \quad (Ec. 8)$$

Donde  $Ms$  es el peso en gramos de masa seca;  $\%T_{105}$  es el porcentaje de sólidos totales en la muestra (valor promedio), a 105° Celsius,  $Mcont$  es el peso

inicial en gramos de la muestra y el recipiente; y *Mash* es el peso final en gramos de la muestra y el recipiente.

- **Carbono fijo:**

El carbono fijo se obtiene por la diferencia a 100 de los porcentajes de humedad, materia volátil y cenizas. Todos los valores, están basados de acuerdo al contenido de humedad según la Norma ASTM E1756-08.

$$CF = 100\% - (\%Cenizas + \%MV + \%B_{105}) \quad (Ec. 9)$$

### 3.2.2 Análisis elemental

Por medio del análisis elemental, se determinaron los porcentajes de carbono, hidrogeno, Nitrógeno y azufre del biosólido con 3.5% de humedad. Para la aplicación del procedimiento, cada una de las muestras se introduce en el analizador elemental, y se oxidan en atmósfera controlada, hasta obtener la conversión total y cuantitativa de los componentes en dióxido de carbono, agua, nitrógeno y óxidos de nitrógeno. Estos gases, pasan a través de una celda de IR (Infrarrojo) y permiten determinar los contenidos de Carbono y de hidrogeno, y por una celda TC (de conductividad térmica) para determinar el contenido de Nitrógeno.

En el Laboratorio de Análisis Industriales de la Universidad del Valle se estimaron los porcentajes de carbono, hidrogeno y nitrógeno. El contenido de azufre se determinó con el analizador elemental LECO S-144DR en el Laboratorio de Metalurgia del grupo de investigación de carbones y carboquímica, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. El contenido de oxígeno se calcula por diferencia con respecto a los porcentajes de los elementos obtenidos.

### 3.2.3 Determinación del poder calorífico

La determinación del poder calorífico superior PCS se realizó experimentalmente de acuerdo con la Norma Estándar (por sus siglas en inglés) Standard Test Method for Testing ASTM D 5865-07 de la American Society for Testing and Materials (ASTM). El procedimiento se efectúa mediante una bomba calorimétrica en el que a volumen constante y bajo atmósfera de oxígeno, se realiza la combustión completa de una cantidad unitaria del material en condiciones adiabáticas. El contenido calorífico se determinó de forma experimental tanto para el biosólido, como para los productos sólidos obtenidos con la pirólisis a temperaturas finales de 400° y 500° Celsius.

El poder calorífico superior se determinó en el laboratorio de carbones del Instituto de Recursos Mineros y Energéticos IRME en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia con sede en Sogamoso, mediante el calorímetro LECO AC600, el cual se calibra con un patrón de ácido benzoico. El poder calorífico determinado de forma experimental está relacionado con la masa del cada material que se somete a combustión, el aumento de la temperatura del sistema debido al calor producido y la capacidad calorífica del calorímetro.

### 3.3 PROCESO DE CONVERSIÓN

#### 3.3.1 Pirólisis

Para llevar a cabo los procesos de degradación y transformación térmica del material residual, se implementa la pirólisis lenta, mediante la cual se promueve la formación del carbonizado, empleado bajas velocidades de calentamiento y con temperaturas finales de reacción hasta de 500° Celsius<sup>106</sup>. Inicialmente se selecciona el peso del Biosólido. En este estudio, se utilizaron 25 gramos del biosólido, los cuales se adicionaron a los crisoles. Se realizaron dos ensayos de pirólisis con temperaturas finales distintas y con escalas de calentamiento y tiempo similares.

Para ejecutar el calentamiento, se utilizaron dos crisoles de porcelana con tapa, pesados previamente, los cuales fueron introducidos dentro de un crisol dispuesto para preparar carbón activado, y finalmente se incorporaron a una mufla Terrígeno. Adicionalmente, para mejorar el sellado y limitar el acceso de oxígeno a las muestras se incorporó arcilla a cada uno de los crisoles. De igual forma, con el fin de permitir el flujo de humedad, se seleccionaron algunos orificios.

Figura 7. Proceso de pirólisis del biosólido en mufla



Fuente: Autores

Las distintas rampas de calentamiento se modificaron manualmente. El tiempo final de residencia empleado para los ensayos con temperaturas finales de 400° y 500° Celsius tuvo una duración de 4 horas (240 minutos). En la tabla 4 se muestran las variables utilizadas en el proceso de pirólisis de los biosólidos.

Una vez finalizado el proceso de calentamiento, las muestras se enfriaron cuidadosamente, para evitar el contacto directo con el aire del ambiente exterior. Finalmente, se determinó el peso de las muestras obtenidas con el proceso.

---

<sup>106</sup> GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Eduardo Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Trabajo de (Magíster en Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Bogotá, D.C., Colombia 2011. p.112.

Tabla 4. Proceso empleado en la pirólisis del biosólido con distintas temperaturas finales

Temperatura final (°C Celsius)	Calentamiento (°C Celsius)	Tiempo de sostenimiento (min)
<b>400</b>	105	20
	150	15
	200	15
	250	30
	300	15
	400	180
<b>500</b>	105	20
	150	15
	200	15
	250	30
	350	15
	450	15
	500	180

Fuente: Autores

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR OBTENIDO A PARTIR DE LA PIRÓLISIS DEL BIOSÓLIDO

El biochar se caracterizó mediante análisis elemental, análisis próximo, microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos X y poder calorífico. Las normas tomadas como base para efectuar los análisis elemental, próximo y el poder calorífico corresponden a las mismas aplicadas para los biosólidos.

#### 3.4.1 Análisis del biochar mediante microscopia electrónica de barrido

El análisis de caracterización textural de los biochars se realizó en el Microscopio Electrónico de Barrido *ZEISS OXFORD INSTRUMENTS X-ACT* del laboratorio de caracterización de materiales del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de materiales (INCITEMA-UPTC). Las muestras del Biochar obtenidas a temperaturas finales de 400° Y 500° Celsius se trataron previamente, para retirar la mayor parte de impurezas y obtener un material más uniforme, utilizando un sistema de recubrimiento de bombeo rotatorio compacto QUORUM.

Adicionalmente, se incorporaron en porta muestras de aluminio para su posterior observación en el microscopio. A través de la interacción de un haz de electrones sobre la superficie de las dos muestras de biochar, se pueden obtener imágenes de alta resolución con apariencia tridimensional, usando lentes con objetivo de 1000 y 2000 X.



### 3.4.2 Difracción de rayos X (XRD)

El análisis de difracción de Rayos X (DRX) aplicado al sólido obtenido por pirólisis, se realizó en el Laboratorio del Incitema de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, mediante el Difractómetro de Rayos X en el desarrollo del proceso, las muestras del biochar se incorporan en el portamuestras del difractómetro, manteniéndose en posición horizontal para favorecer la orientación de las estructuras cristalinas, posteriormente a través del dispositivo o tubo de rayos X, se hace incidir un haz de rayos X, el cual interactúa con el material sólido. La radiación incidente se dispersa a través de los átomos en distintas direcciones, formando rayos difractados. Por último, el difractograma recoge los datos e intensidad en función del ángulo de difracción.

## 3.5 CARACTERIZACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINERÍA

### 3.5.1 Recolección del drenaje de la mina

La toma de las muestras del drenaje se realizó en la mina de carbón Los Neisas ubicada en la Vereda Loma Redonda en el Municipio de Samacá. En la tabla 5 se identifican los aspectos generales referentes a la recolección, para su posterior análisis y caracterización.

Tabla 5. Ficha de identificación de la muestra.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
<b>Tipo de agua</b>	Drenaje Minero
<b>Sitio de muestreo</b>	Vereda Loma Redonda , Municipio de Samacá
<b>Punto de Muestreo</b>	Efluente Mina de Carbón
<b>Tipo de muestreo</b>	Muestreo Simple
<b>Fecha y Hora de Muestreo</b>	13/10/2017 14:00
<b>Recolectada por</b>	Mónica Gil, Alejandra Acero
<b>Objeto</b>	Caracterización
<b>pH</b>	2-3

Fuente: Autores

### 3.5.2 Preservación de la muestra.

La recolección de la muestra del efluente ácido se realizó en un recipiente de vidrio ámbar con tapa, con capacidad de 4 litros, el cual, previamente se lavó con agua del grifo y agua desionizada.

Para la conservación y el almacenamiento del drenaje minero, las muestras se filtraron y se acidularon con ácido nítrico  $\text{HNO}_3$ , de acuerdo con los procedimientos propuestos por el IDEAM y los requerimientos dados por el

Standard Methods, para cada parámetro a analizar en el laboratorio. Posteriormente, se conservaron refrigeradas a 4°C Celsius<sup>107</sup>

### **3.5.3 Obtención de los parámetros fisicoquímicos del drenaje de mina.**

Los procedimientos aplicados para la caracterización de la muestra recolectada se ejecutaron de acuerdo con cada parámetro específico. La medición de pH se realizó de acuerdo al método potenciométrico, utilizando pHmetro; para la dureza total, cálcica y magnésica se aplicó el método de titulación, preparando una disolución de 10 ml de drenaje ácido en 100 ml de agua destilada.

La determinación de hierro total se realizó con el método colorimétrico, utilizando fenantrolina de hierro como reactivo; y los sulfatos se obtuvieron por método turbidimétrico, estos dos parámetros, al igual que la turbiedad se midieron a través del fotómetro *Spectroquant Colorimeter Multy* de *Merck*.

La medición del hierro se realizó aplicando una dilución de 1mL de agua del drenaje en 1000mL de agua destilada, y los sulfatos, a partir de una dilución de 10mL del drenaje minero en 100mL de agua destilada. Para la determinación de acidez, se aplicó el método de titulación, utilizando una dilución de 25mL de muestra del drenaje minero en 250mL de agua destilada. La conductividad eléctrica se midió con el conductivímetro *Schott Handylab LF12*.

## **3.6 ESTUDIO DEL BIOCHAR EN EL TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS**

Para valorar el efecto del Biochar en el drenaje minero, se utilizaron dosis de 1 g de cada Biochar de 400° y 500° Celsius, los cuales se adicionaron a vasos de precipitado que contenían 150 ml del efluente minero. Las muestras se colocaron sobre planchas de agitación magnética durante 24 horas a una temperatura de 25° Celsius.

### **3.6.1 Métodos de caracterización para las muestras obtenidas del tratamiento del drenaje ácido**

- **pH, conductividad, acidez y Dureza Total.**

La caracterización de las muestras obtenidas se desarrolló de acuerdo a procedimientos específicos para cada parámetro. El pH las muestras se midió utilizando un pH metro *Schott Handylab pH11* y la conductividad eléctrica con el conductivímetro *Schott Handylab LF12*.

La dureza total, cálcica y magnésica y el contenido de acidez se determinaron por el método de titulación, aplicando una dilución de 5 mL de muestra en 50 mL de agua destilada.

---

<sup>107</sup> Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. Toma de muestras de aguas residuales. IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Versión 3. 2007. pp. 17.

- **Hierro total, Sulfatos y Turbiedad.**

Para la determinación de hierro total presente en las muestras, se empleó el método colorimétrico utilizando como reactivo fenantrona de hierro en 10 ml de muestra. En la medición de sulfatos se empleó el método turbidimétrico, usando cloruro de bario y solución tampón para sulfatos como reactivos. Para registrar las concentraciones de hierro, sulfatos y turbiedad, se empleó el fotómetro Spectroquant Colorimeter Multy de Merck. Para obtener las lecturas deseadas, se preparó el equipo introduciendo el parámetro a medir, seguidamente se colocó un blanco en la celda y se ubicó en el compartimiento para muestras, se comprobó la confiabilidad en el resultado y se analizó la celda que contenía la muestra. Finalmente se registraron los datos aportados por el equipo.

Se realizó la medición por duplicado, para eliminar datos no confiables y establecer un promedio adecuado de los resultados.

Debido a que algunos elementos objeto de estudio presentaban variaciones en su concentración, se tuvo que experimentar hasta encontrar la dilución que se adecuara al rango de medición del equipo utilizado (tabla 6)

Tabla 6. Diluciones aplicadas a los sistemas de tratamiento con el Biochar

	<b>Hierro</b>	<b>Sulfatos</b>
<b>Biochar 400</b>	1 mL en 100 mL	1 en 100 mL
<b>Biochar 500</b>	1 mL en 100 mL	1 en 100 mL

Fuente: Autores

### **3.7 PRUEBA DE BIOSORCIÓN DE CADMIO EN EL AGUA SINTÉTICA**

Para ejecutar el estudio de adsorción del elemento cadmio en el agua sintética, se realizaron 2 pruebas por cada biochar. Se usó una concentración de 4,2 mg/L de una solución patrón de 1000mg/L de Nitrato de Cadmio Cd (NO<sub>3</sub>) en 1000 mL de agua desionizada; 150 mL de esta dilución se transfirieron a un vaso de precipitado de 250 mL.

Posteriormente 0,3 g de Biochar de 400° Celsius se pesaron y se incorporaron a la solución. La siguiente prueba se llevó a cabo utilizando el mismo volumen de solución de cadmio, y la misma dosis del adsorbente. El pH de las muestras se ajustó a pH 3 y pH 5 con 1M de HNO<sub>3</sub> y 1M de NaOH respectivamente. Las muestras se mantuvieron en agitación continua a 25° Celsius, durante 24 horas. Los experimentos con el Biochar de 500° Celsius se ejecutaron con los procedimientos anteriormente descritos.

#### **3.7.1 Análisis de cadmio en el agua sintética por espectroscopia de absorción atómica.**

La determinación del contenido de cadmio en el agua sintética se realizó mediante espectroscopia de absorción atómica, a través del Espectrofotómetro de Absorción Atómica Shimadzu AA 7000 series del laboratorio de análisis de fluidos del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales (INCITEMA). Previamente se realizaron diluciones tomando 2 mL

de cada muestra tratada en 10 mL de agua desionizada. En la aplicación del proceso, las muestras se atomizan mediante el método de llama, y la fuente de radiación emitida a través de una lámpara de cátodo hueco, produce una longitud de onda que es absorbida y medida por el detector.

Figura 8. Experimento de adsorción del biochar en el agua sintética.



Fuente: Autores.

## 4. ANÁLISIS, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL BIOSÓLIDO

En los siguientes apartados se presentan los resultados de la caracterización realizada a los biosólidos de la PTAR de Sotaquirá, los cuales fueron estimados de acuerdo con los lineamientos dados por la Norma estandarizada de la American Society for Testing Materials (ASTM) y los requerimientos establecidos por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UPTC.

El secado inicial del material a 105° Celsius permitió reducir la mayor cantidad de agua del biosólido hasta conseguir un porcentaje de humedad de 3.5%. Mediante el análisis de granulometría de los biosólidos, se determinaron los tamaños de partículas correspondientes a la fracción 20/80 y la fracción 80.

Tabla 7. Fracciones de granulometría de los biosólidos.

Fracción	Tamaño de partículas $\mu\text{m}$	Porcentaje de biosólidos (%)
Fracción % 20/80	>180	75.676
Fracción % 80	<180	24.323

Fuente: Autores

De acuerdo con los resultados obtenidos en la tabla 7, se pudo establecer que un 75.68% de partículas del biosólido tienen un tamaño superior a 180 micrómetros, y que un 24.32% de la muestra, presentó un diámetro menor a 0.180 mm (malla N°80). Los materiales presentaron una mayor aglomeración debido a que contenían algún grado de humedad, que facilitaba la unión de las partículas, y por lo tanto, se generaron dificultades en los procesos de trituración y tamizaje.

### 4.2 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL DE LOS BIOSÓLIDOS

A continuación se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos y elementales, así como el poder calorífico del biosólido, y se realiza una comparación con algunos datos reportados en la literatura de materiales de diferente procedencia.

Los biosólidos presentaron un pH de 6.9, el cual se encuentra dentro del rango típico para lodos digeridos (5.0-8.0), dado por Metcalf y Eddy<sup>108</sup>. Al realizar la comparación del biosólido con otras materias primas, se reflejan diferencias en los valores finales debido a la naturaleza y la composición de cada material.

---

<sup>108</sup> TORRES LOZADA, Patricia, et. al. Eliminación de patógenos en biosólidos por estabilización alcalina. Universidad Nacional de Colombia. Palmira., vol. 58, núm. 3, 2009, pp. 197-205.

Tabla 8. Caracterización de Biosólidos PTAR Sotaquirá.

Análisis Próximo %			Análisis elemental %					Poder Calorífico			
B	Mv <sub>bs</sub>	Ce <sub>bs</sub>	C <sub>bs</sub>	H <sub>bs</sub>	N <sub>bs</sub>	S <sub>bs</sub>	O <sub>bs</sub>	PCS <sub>bs</sub> Cal/g	PCS <sub>bs</sub> MJ/ Kg	PCI <sub>bs</sub> MJ/ Kg	PCI <sub>Boie</sub> MJ/kg
3.5	56.85	32.38	42.4	6.58	2.41	0.82	47.7	4829	20.22	18.63	17.54

Fuente: Autores

Con respecto al análisis elemental, el contenido de azufre de los biosólidos de la PTAR de Sotaquirá se encuentra dentro de los valores típicos para lodos que han sido digeridos, de 1.45% y 0.81%. Otros biosólidos tratados anaeróbicamente, como los de la PTAR El Salitre, reportan valores de azufre elemental de 3.99%, los cuales están muy por encima del contenido típico de azufre<sup>109</sup>. Adicionalmente, los contenidos de azufre para varios carbones provenientes de varias minas colombianas, presentan un rango entre 0,44 y 1,91%, de lo que se puede inferir que al incluir los biosólidos de la PTAR de Sotaquirá en tratamientos termoquímicos, como combustión, pirólisis, o gasificación, se presentarían emisiones de ácido sulfúrico, y óxido de azufre similares a las que se presentarían al emplear el carbón.

Un contenido superior de cenizas de los biosólidos en comparación con algunas biomazas, como el carbón bituminoso (5,4%) y la madera de haya (0.39%), se debe principalmente a que estos subproductos contienen una mayor cantidad de sustancias inorgánicas no combustibles, provenientes del agua residual. De igual forma, los procesos de tratamiento empleados para la estabilización de estos lodos como la digestión anaerobia, conllevan un aumento en el porcentaje final de las cenizas en los biosólidos, como consecuencia de la descomposición del material biodegradable por parte de los microorganismos, haciendo que la proporción de cenizas sea más significativa que en los biosólidos sin digestión. Los biosólidos provenientes de la PTAR El Salitre, por ejemplo, tienen unos contenidos de cenizas superiores, por su tratamiento anaeróbico<sup>110</sup>.

Los valores obtenidos de cenizas para los biosólidos estudiados son relativamente cercanos a otros porcentajes inorgánicas provenientes de depuradoras de aguas residuales urbanas estimados entre 39,10% y 37%<sup>111</sup>. Algunos valores típicos como los propuestos por Harman., et. al. y Gupta y

<sup>109</sup> ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Análisis Termo gravimétrico de la Pirólisis de Biosólidos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre. Trabajo de Grado (Magister en Ingeniería - Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá, D.C., Colombia. 2015. p. 105.

<sup>110</sup> Ibid., p. 56.

<sup>111</sup> COLOMER F.J., et. al. Op. cit. p. 6

Garg,<sup>112</sup> establecen valores superiores a los obtenidos en este estudio, para lodos digeridos.

Con relación al contenido de materia volátil, el valor típico establecido para los biosólidos municipales que han sido digeridos se encuentra alrededor del 50,1%, el biosólido de la PTAR de Sotaquirá presenta un contenido superior de materia volátil, con un valor promedio de 57%. Otros materiales como el carbón, posee un contenido aproximado del 17%, por el contrario la Madera de Haya alcanza porcentajes de materia volátil hasta del 90%. Metcalf y Eddy<sup>113</sup> establecen rangos de sólidos volátiles para lodos primarios digeridos entre 30 a 60%, con un valor típico de 40% y para lodos activados, un contenido de sólidos volátiles entre 59% y 88%. El contenido de materia volátil se relaciona con la materia orgánica presente en el biosólido, siendo el potencial generador de olores un indicador de su contenido.

La materia volátil también es un indicador de la reactividad de un material, dado que a una mayor cantidad en volátiles, los carbones son más reactivos, debido a que liberan los volátiles a menores temperaturas y tasas de reacción superiores, este efecto incrementa la capacidad de transformación de los combustibles sólidos en procesos termoquímicos como la gasificación y la combustión. En la siguiente tabla, se realiza una comparación de los valores de Carbono fijo y su relación con el contenido de material volátil para diferentes materiales y sus carbonizados.

Tabla 9. Carbono fijo y relación Materia Volátil- Carbono Fijo para diferentes biomásas.

<b>FUENTE</b>	<b>CF</b>	<b>MV/CF</b>
Biosólido PTAR Sotaquirá	7.27	7.81
Biocarbón PTAR Sotaquirá	11.76	2.04
Semilla de albaricoque	21.47	3.6
Carbonizado semilla de albaricoque	71.70	0.28
Cascara de castaña	28.67	2.43
Carbonizado de castaña	60.32	0.57
Madera	9.71	9.26
Carbón	77.54	0.22

Fuente: ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia, Autores.

La relación tanto del material volátil como del carbono fijo disminuye en los carbonizados con respecto a sus materias primas iniciales, este efecto también se presenta para el biosólido de la PTAR de Sotaquirá y el biocarbón generado. A su vez, estos valores superan la relación de materia volátil-carbono fijo en el carbón, por tanto las biomásas, el biosólido y sus carbonizados necesitarían

<sup>112</sup> GUPTA Renuka; GARG V.K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting Journal of Hazardous Materials Volume 153, Issue 3 . pp. 1023-1030.

<sup>113</sup> LIMÓN MACÍAS, Juan Gualberto. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso? Trabajo de Grado (Especialidad Ingeniería Química). Guadalajara, Jalisco. 2013. p. 45.

menos tiempos de residencia en procesos de combustión<sup>114</sup>, también afirma lo propuesto anteriormente con relación a la reactividad de los combustibles sólidos, dado que al aumentar el contenido de carbono fijo por ejemplo en el carbón, se requiere una mayor energía de activación para liberar los volátiles en el proceso de pirólisis.

#### 4.3 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

El poder calorífico Superior del biosólido y los productos sólidos obtenidos con la pirólisis se determinó experimentalmente de acuerdo con la Norma ASTM 5865-07. El poder calorífico Inferior se estimó a partir del Poder Calorífico Superior, del análisis elemental y del contenido de agua, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$PCI = PCS - 2.454 * (W + 9H) \quad (Ec. 10)$$

Donde PCS es el poder calorífico superior en MJ/kg, W es el porcentaje de humedad de la muestra en base seca y H es el contenido de Hidrógeno basado en el análisis elemental<sup>115</sup>.

El poder calorífico Inferior también se determinó de acuerdo con la correlación propuesta por Boie para combustibles sólidos:

$$PC = 0.3515 C + 1.1617 H + 0.06276 N + 0.1046 S - 0.1109 O \quad (Ec. 11)$$

Donde C, H, N, S, O son los porcentajes de Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Azufre y Oxígeno de la muestra en base seca y PC es el poder calorífico Inferior en MJ/kg.

##### 4.3.1 Resultados del poder calorífico del biosólido

En la tabla 10 se presentan algunos materiales y combustibles sólidos y sus respectivos valores de Poder Calorífico Superior y Poder Calorífico Inferior. Se puede evidenciar que el biosólido utilizado en este trabajo, tiene un valor calorífico Inferior (PCI), relativamente mayor que varios rangos establecidos por algunos autores para lodos digeridos y secos, con excepción del Poder Calorífico Inferior establecido por Murakami., et. al.<sup>116</sup> Con relación a los otros combustibles, como los carbones de clase antracita y bituminoso, estos tienen valores caloríficos superiores, lo cual está directamente relacionado con el alto contenido de carbono fijo, y el bajo porcentaje de cenizas (2-8%), ya que este último determina el contenido de material incombustible, y por lo tanto define la calidad del carbón. En este sentido, el biosólido utilizado tiene un menor poder calorífico, y por ende menor energía aprovechable comparativamente con el carbón, debido a un porcentaje de cenizas superior (32.3%) y menor carbono fijo (7%).

<sup>114</sup> ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Op. cit. p. 81.

<sup>115</sup> KHALID RAFIQ, Muhammad., et.al. Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (Zea mays L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. 2011. p. 11.

<sup>116</sup> COLOMER F.J., et. al. Op. cit. p. 181.



A pesar del contenido en cenizas del biosólido, el poder calorífico del biosólido resulta de gran interés en distintas aplicaciones, teniendo en cuenta que presenta valores bajos en azufre y nitrógeno, que implican un bajo potencial de contaminación atmosférica asociada a la generación de óxidos de azufre y nitrógeno, y por lo tanto en procesos de conversión, su consumo los hace ambientalmente seguros<sup>117</sup>.

Tabla 10. Comparación del poder calorífico de algunas biomásas y combustibles comunes.

<b>FUENTE</b>	<b>PODER CALORÍFICO SUPERIOR PCS MJ/kg</b>	<b>PODER CALORÍFICO INFERIOR PCI MJ/kg</b>
<b>Biosólidos</b>		
Biosólido PTAR Sotaquirá	20.22	18.63
<b>Datos en referencias bibliográficas</b>		
Biosólido PTAR Colombia	16.23	15.35
Hartman et al	-	6.73
Metcalf y Eddy	-	9 – 13
Murakami et al	-	20.1
<b>Otros combustibles sólidos</b>		
Carbón	23.968	22.73
Carbón bituminoso	27.267	26.122
Residuos forestales	16.473	15.402
Coque de petróleo	31.308	29.505
Madera	18.03	17.01

Fuente: Harman., et. al., Metcalf y Eddy., Murakami., Autores

Desde el punto de vista del uso energético de los biosólidos como reemplazo del carbón, el poder calorífico es la propiedad combustible más importante. De la tabla 10, se puede observar que el valor calorífico del biosólido de la PTAR de Sotaquirá (18.63 MJ/kg) es aproximadamente un 77% del valor calorífico del carbón fósil. Este porcentaje le confiere a los biosólidos de la PTAR de Sotaquirá la posibilidad de ser aprovechados en procesos energéticos, permitiendo como primera medida, un manejo adecuado y seguro, asociado a la eliminación de patógenos, acompañado de una reducción en el volumen generado. Así mismo, los procesos de valorización energética de los biosólidos, se mencionan dentro de las alternativas de uso propuestas por el Decreto 1287 de 2014<sup>118</sup>.

Adicionalmente, y de acuerdo con algunos autores, el aprovechamiento energético de los biosólidos ofrece una menor dependencia de los combustibles fósiles, como el carbón, la mitigación de la contaminación ambiental, y el calentamiento global, dada su capacidad de regeneración, es decir, no se

<sup>117</sup>CORTEZ, Vicente. Carbón. p. 47. Disponible en <<http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf>>

<sup>118</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287(10, Julio. 2014). Op. cit. p. 9.

agotan con su utilización, por tanto, los biosólidos se pueden considerar como una fuente de energía renovable.

No obstante, las desventajas asociadas al uso energético de los biosólidos estarían relacionadas con los costos de transporte y sus efectos ambientales, desde el sitio de generación hasta los sistemas de conversión térmica, lo que podría significar la emisión de gases contaminantes. A su vez, dado el contenido de cenizas del biosólido, se podrían incrementar los sobrecostos de manipulación y tratamiento, así como los problemas de erosión en los equipos de transporte, y se requeriría una eficacia superior en la depuración de partículas<sup>119</sup>.

#### 4.4 RENDIMIENTO DEL BIOCHAR

Los rendimientos de los productos de la pirólisis del Biosólido de la PTAR de Sotaquirá, se determinaron mediante la siguiente expresión:

$$\text{Rendimiento (\%)} = \left( \frac{\text{peso del Biochar}}{\text{Peso de la Biomasa}} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 12})$$

La tabla 11 muestra una comparación de los rendimientos de los productos obtenidos en este estudio y los de diferentes biomاسas, teniendo en cuenta la temperatura final de pirólisis.

Tabla 11. Rendimiento de Biochar derivados de diferentes biomاسas y su relación con la temperatura de pirólisis.

TEMPERATURA DE PIRÓLISIS (°C)	MATERIAL INICIAL	RENDIMIENTO (%)
300	Residuos de Maíz	66
400		37
500		29.2
300	Madera	43.7
450		27
500	Lodos Residuales Municipales	45-54
600		43.41
400	Biosólido Ptar Sotaquirá	46.87
500		41.91

Fuente: Khalid; Agrafiotu., et. al.; Zienliska., et. al.; Autores.

En la tabla anterior se puede apreciar el efecto de la temperatura de pirólisis en el rendimiento de diferentes biocarbones, indicando que con un incremento en la temperatura de pirólisis, se genera una disminución en el rendimiento del Biochar producido a partir de diferentes tipos de biomasa. Este mismo efecto sucede para el Biochar obtenido en el presente estudio, ya que el producto que se obtiene a 400°C presenta un mayor rendimiento con respecto al Biochar producido a una temperatura final de 500°C. Las diferencias dadas en el rendimiento de los materiales finales, se deben a los cambios estructurales que

<sup>119</sup> CORTEZ, Vicente. Op. cit. p. 15.

se presentan durante el proceso de pirólisis en los componentes principales de cada biomasa y el contenido lignocelulósico.

Para Capadoglio., et. al.,<sup>120</sup> una disminución en el rendimiento del producto sólido obtenido con la pirólisis, se genera como resultado de un incremento en la temperatura final de pirólisis, debido a la volatilización de las fracciones orgánicas.

El descenso en el rendimiento con la temperatura, según Berenguer<sup>121</sup>, se debe a que las altas temperaturas favorecen reacciones de craqueo térmico, en donde moléculas de mayor peso molecular se rompen formando moléculas menores, que constituyen los gases no condensables. Así mismo, la disminución en el rendimiento del biochar bajo esta condición, está relacionada con una mayor conversión de la pirólisis, y por lo tanto, se puede atribuir a una mayor descomposición primaria del material en el proceso de conversión inicial o a reacciones secundarias del residuo sólido. Algunos investigadores, han reportado la disminución en el rendimiento del biochar con el aumento de la temperatura de pirólisis. Kim y Parker<sup>122</sup>, por ejemplo obtuvieron una disminución del 34% en los productos de pirólisis de lodos, cuando la temperatura efectuada aumentaba de 250°C a 500°C. Hossain., et. al.,<sup>123</sup> también observaron que con temperaturas de producción a 300°C, los rendimientos del biochar producido a partir de lodos secos eran cercanos al 72% del peso inicial, por el contrario, con temperaturas por encima de 700°C, el rendimiento era de 52%.

No obstante, Fu., et. al., afirma que los aumentos en la temperatura de pirólisis, favorecen los rendimientos de las fracciones gaseosas por las transformaciones secundarias en el material<sup>124</sup>.

De acuerdo con Sadaka<sup>125</sup>, otra variable que puede afectar negativamente el rendimiento del biochar, y de los combustibles como productos de la pirólisis, es la heterogeneidad de la biomasa al considerarse los productos individuales derivados de cada uno de sus elementos. A su vez, se ha establecido que la pérdida másica en los productos finales de la pirólisis también está asociada a la

---

<sup>120</sup> CAPODAGLIO, A.G. Properties and beneficial uses of biochar from sewage sludge pyrolysis. Department of Civil Engineering & Architecture. University of Pavia. Pavia. Italy. Disponible en <[http://uest.ntua.gr/athens2017/proceedings/presentations/A\\_G\\_Capodaglio.pdf](http://uest.ntua.gr/athens2017/proceedings/presentations/A_G_Capodaglio.pdf)>

<sup>121</sup> BERENGUER, Julia Moltó. Descomposición térmica de residuos textiles; estudio cinético y formación de contaminantes. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química. Alicante. 2007. p. 307.

<sup>122</sup> AGRAFIOTIA, Evita., et. al. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Volume 101. 2013.p. 72-78

<sup>123</sup> Ibid., p. 78.

<sup>124</sup> KHANMOHAMMADI, Zahra; AFYUNI Majid; REZA MOSADDEGHI, Mohammad. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. Waste Management & Research. 2015. p. 9.

<sup>125</sup> SADAKA Samy. Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization. Energies. 2014.p. 548- 567.

condensación de los compuestos alifáticos y la pérdida de dióxido de carbono, metano e hidrógeno gaseoso<sup>126</sup>.

#### 4.4.1 Caracterización del producto obtenido de la pirólisis

En la siguiente tabla se muestra el consolidado de resultados de la caracterización de los Biochars BC400 y BC500 y el biosólido inicial. Se presenta también, el poder calorífico experimental y el poder calorífico inferior, los porcentajes del rendimiento de cada fracción y la máxima energía de pirólisis para cada biochar.

Tabla 12. Comparación de los parámetros de caracterización de los biosólidos y los productos obtenidos de la pirólisis.

	Biosólido	Biochar 400°C	Biochar 500°C
<b>Análisis elemental (bs. %)</b>			
C	42.47	22.08	22.02
H	6.58	1.65	1.63
N	2.41	2.14	2.11
S	0.82	0.90	0.83
O	47.42	73.24	73.41
<b>Análisis Próximo (bs. %)</b>			
Humedad	3.5	0.25	0.30
Cenizas	32.38	67.27	70.51
Materia Volátil	56.85	20.72	11.45
Carbono Fijo	7.27	11.76	17.74
PCS (MJ/Kg)	20.22	8.33	7.52
PCI (MJ/Kg)	18.68	7.96	7.15
Rendimiento (%)	-	46.87	41.91
Máx. energía pirólisis (MJ/kg)	-	16.3	17.07

Fuente: Autores

En cuanto al análisis elemental, el contenido de Hidrógeno en el Biochar disminuyó con respecto al biosólido debido a las reacciones iniciales de polimerización que implican la pérdida de hidrógeno, a través de la transferencia interna de este elemento<sup>127</sup>. Los contenidos de Nitrógeno y Azufre del Biochar no tuvieron significativas variaciones comparativamente con el biosólido, a su vez, debido a sus bajos porcentajes no se presentarían grandes emisiones relacionadas con óxidos de Nitrógeno y Azufre, que contribuirían a mitigar efectos negativos al ambiente.

<sup>126</sup> KOMNITSAS, Konstantinos, et. al. Adsorption of scandium and Neodymium on Biochar Derived after low-temperature pyrolysis of Sawdust. Universidad de Atenas. Grecia. Minerals. Vol. 7. 2017. p. 18.

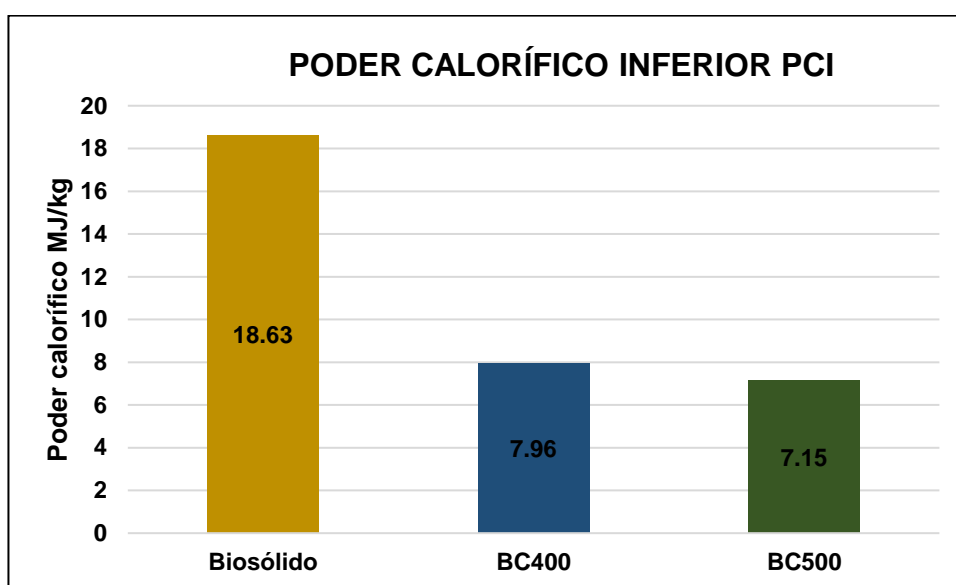
<sup>127</sup> SÁNCHEZ, M. E., et. al. Bio-Fuels and Bio-Char Production from Pyrolysis of Sewage Sludge. Laboratory of Chemical Engineering, University of León. España. Journal of Residuals Science & Technology, Vol. 6, No. 1. 2009. p. 7.

Se reporta un descenso del material volátil posterior a la pirólisis entre un 64% y un 79%. La presencia de material volátil en las muestras BC400 y BC500 indica una descomposición incompleta del biosólido. El carbono fijo aumentó con la temperatura de pirólisis debido a una mayor carbonización.

#### 4.4.2 Resultados del poder calorífico del biochar

En la siguiente grafica se pueden apreciar los resultados del poder calorífico inferior para el biosólido, y los biochars BC400 y BC500. Se muestran variaciones del contenido energético con algunos parámetros como la ceniza y el contenido de carbono fijo.

Gráfica 1. Comparación del poder calorífico del biosólido y los biochars BC400 y BC500.

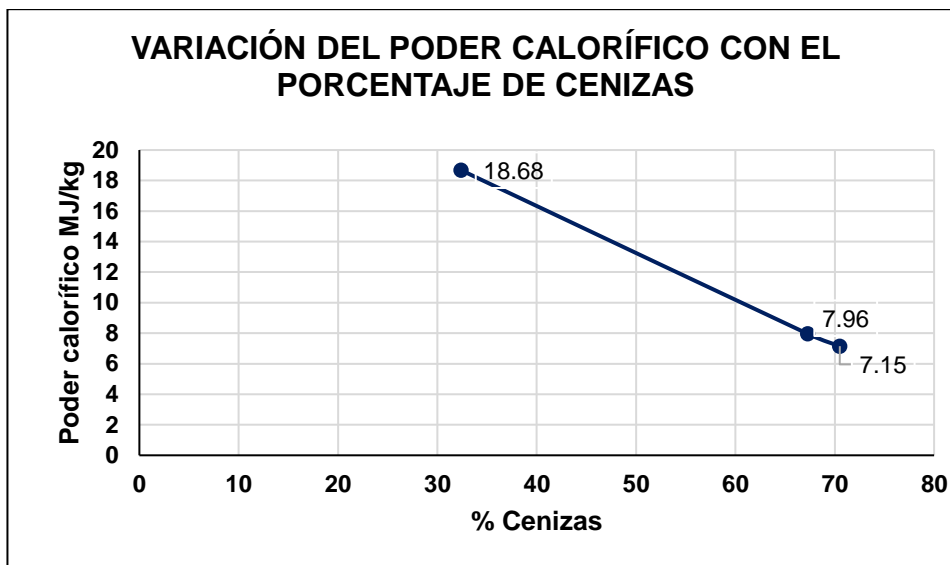


Fuente: Autores

Los resultados del Poder Calorífico Inferior presentados en la gráfica 1 indican que los productos obtenidos mediante pirólisis de los biosólidos a 400 y a 500° Celsius, poseen valores caloríficos considerablemente bajos comparativamente con los valores energéticos del biosólido, lo que puede explicarse debido a al alto contenido de cenizas en los biocarbones, como se muestra en la siguiente gráfica. Un mayor porcentaje de cenizas en el biochar, puede atribuirse a que en él quedan depositados todos los compuestos inorgánicos que no fueron degradados<sup>128</sup>. Como la ceniza no es combustible tiene un impacto negativo en el poder calorífico. La variación en el contenido de ceniza, se debe a las diferentes concentraciones de elementos formadores del material inorgánico, como silicatos de potasio, carbonatos de calcio, hierro y otros metales. De acuerdo con el análisis de difracción de Rayos X (XRD) del Biochar, se presentaron mayores proporciones de óxidos relacionados con el Hierro y el Silicio, que generan mayores contenidos en ceniza.

<sup>128</sup> ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Op. cit. p. 80.

Gráfica 2. Variación del poder calorífico del biosólido, y los biochars con el porcentaje de cenizas.



Fuente: Autores

El contenido de carbono fijo (CF) del biochar aumentó con el incremento en la temperatura de pirólisis, debido a una mayor pérdida del material volátil. El carbono fijo provee una estimación aproximada del valor calorífico de un combustible y es la fuente principal de calor que se genera durante la combustión. Al igual que con el material volátil, la temperatura de pirólisis es el factor más importante que afecta el contenido de carbono fijo.

Al aumentar la temperatura de pirólisis, el material volátil tiende a disminuir, lo cual se reporta Sadaka., et. al.,<sup>129</sup> con diferentes biomásas y sus productos de pirólisis. Un mayor contenido de material volátil indica una ignición fácil y mayor volatilización del combustible.

También se puede establecer que el poder calorífico de las muestras disminuye al aumentar la temperatura final de pirólisis. De esta forma el Biochar obtenido a una temperatura final de 500° Celsius obtuvo un menor poder calorífico, con respecto al Biochar obtenido a 400° Celsius. Las variaciones del Poder calorífico con la temperatura de pirólisis, también se presentan por los cambios en los componentes estructurales, por la volatilización y carbonización del material en determinadas zonas de temperatura. Los componentes de la fracción sólida del Biochar obtenido a 500° Celsius que contribuyen al valor energético, se volatilizan en mayor proporción a elementos gaseosos como metano (CH<sub>4</sub>) y H<sub>2</sub> por el aumento en la temperatura final de pirólisis<sup>130</sup>.

<sup>129</sup> SADAKA Samy. Op. cit. p.

<sup>130</sup> WEN, Tsai. An analysis of the use of bioslugde as an Energy Source and Its Environmental benefits in Taiwan. Universidad de Ciencia y Tecnología. Energies. Vol. 5. 2012. p. 3064-3073.

La siguiente tabla muestra los valores de poder calorífico Superior e Inferior, para algunos combustibles sólidos, al igual que los contenidos energéticos para los residuos carbonosos obtenidos en este trabajo. Se puede identificar un contenido energético de los productos de la pirólisis muy bajos con respecto a los otros combustibles como el carbón y la biomasa, como se dijo anteriormente, esto se debe al alto contenido en cenizas que presento cada Biochar, en el caso de los biomasa tiene contenidos de cenizas menores al 10%, y en cuanto a los carbones tienen menos del 6% de cenizas<sup>131</sup>.

Tabla 13. Comparación del poder calorífico de diferentes materiales y los biochars BC400 y BC500.

	<b>PCS (MJ/kg)</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>
Carbón	23.97	22.73
Carbón bituminoso	27.27	26.12
Biomasa vegetal	18.12	17.21
Residuos de maíz	17.41	16.37
Lignito	19.3	14.6
Antracita	34.7	34.3
Biochar BC400	8.33	7.52
Biochar BC500	7.96	7.15

Fuente: Harman., et. al., Metcalf y Eddy., Murakami., Autores

De la tabla anterior, se puede observar que el poder calorífico de los biochars (7.5 y 7.15 MJ/kg) es aproximadamente un 33% del poder calorífico del carbón, y un 40% del valor calorífico del biosólido, por tanto, se generaría una mayor limitación del biochar en su uso como combustible, y como sustituto del carbón, o la biomasa. Adicionalmente, el alto contenido en cenizas aumentaría costos de manejo, y métodos para la depuración de partículas. Algunos autores han reportado valores caloríficos de biocarbón producido de lodos residuales digeridos en un rango de 5.2 a 16 MJ/kg<sup>132</sup>. Con base en su poder calorífico, se han propuesto opciones para su recuperación energética, asociadas por ejemplo en procesos de calentamiento de reactores así como en secado. Así mismo, algunas investigaciones han planteado realizar procesos de co-pirólisis para mejorar el poder calorífico del biochar obtenido de lodos residuales, utilizando un segundo material como madera y residuos biomásicos, con este método se consigue duplicar el contenido energético del biochar.

La Norma ASTM D388-12 establece categorías de clasificación de los carbones de acuerdo con sus propiedades gradacionales, el poder calorífico, y el carbono fijo. Estas categorías indican rangos de características físicas y químicas útiles, para realizar estimaciones del comportamiento del carbón. De acuerdo con esta

<sup>131</sup> ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Op. cit. p. 80.

<sup>132</sup> SAMANYA Janat. Increase of energy recovery from sewage sludge. Aston University. 2013. p. 263.

clasificación, los biocarbones obtenidos a 400° y 500° Celsius, presentan contenidos de carbono fijo y poder calorífico superior, equivalentes al lignito (<19.3 MJ/kg), que es el carbón de mayor bajo rango. A su vez, el poder calorífico superior del biosólido, se encuentra dentro del rango establecido para un carbón sub-bituminoso (19.3-22.1 MJ/kg).

De acuerdo con la Unidad de planeación minero energética UPME, los carbones sub-bituminosos son empleados en la generación de energía eléctrica y en procesos industriales<sup>133</sup>. Por el contrario, por su bajo poder calorífico, el lignito es utilizado para la generación de calefacción, así como en hornos a través de briquetas de lignito.

#### 4.4.3 Máxima energía de pirólisis

El máximo potencial de energía disponible durante la pirólisis fue estimado con la siguiente ecuación:

$$\text{Max. energía pirólisis} = \text{HHV biomasa} - (\text{biochar HHV} * \text{rendimiento biochar}) \quad (\text{Ec 13})$$

Donde HHV biomasa es el poder calorífico superior de la biomasa o el material inicial y HHV biochar, es el poder calorífico superior del biochar.

La tabla 12 presenta los datos de la energía máxima de los biochars BC400 y BC500 generados mediante la pirólisis de los biosólidos.

Los resultados mostraron que el balance neto de energía de los biochars preparados a 400 y 500 grados no difirió significativamente, sin embargo con la muestra BC500 se obtuvo un valor ligeramente superior de energía. Un estudio de pirólisis con residuos de maíz a 400 y 500° Celsius<sup>134</sup> reportó una tendencia similar en el balance neto de energía, con valores de 8.03 MJ/kg y 10.12 MJ/kg respectivamente.

#### 4.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LOS BIOCHARS

Por medio del análisis de microscopía electrónica de barrido se puede establecer, que los biochar producidos presentan tamaños de poro entre 1 y 5 micrómetros, de acuerdo a la clasificación dada por la IUPAC, estos materiales se pueden definir como macroporosos, ya que su tamaño de poro es superior a los 50 nanómetros. En las figuras 7 y 8 que se muestra a continuación se ilustran materiales con una forma irregular, no tienen una estructura de poros ordenada, y la apariencia es similar para los dos biochars.

No obstante los biochars producidos con una mayor temperatura final de pirólisis, presentaban mayores tamaños de poro con respecto a los biochar obtenidos con temperatura de 400° Celsius, esto se debe a que el ratio de calentamiento determina la extensión de los poros. De acuerdo con Cetin., et. al.,<sup>135</sup> los biochars

<sup>133</sup> UPME. El carbón Colombiano. Fuente de energía para el mundo. República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética. p. 53.

<sup>134</sup> KHALID RAFIQ, Muhammad., et.al. Op. cit. p. 1.

<sup>135</sup> CETIN, E., et. al. Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. En: Fuel. Volumen 83. 2004. p. 2139-2150.



que se obtienen con altos ratios de calentamiento conducen principalmente a la formación de macroporos, como resultado del derretimiento, mientras que con bajos ratios de calentamiento se forma principalmente microporos. A su vez Zhang., et. al.,<sup>136</sup> establece que bajo ciertas circunstancias la alta temperatura produce que los microporos se ensanchen porque destruye las paredes de los poros adyacentes, obteniendo una ampliación de los poros. A su vez, la macroposidad presentada en los dos materiales, puede ser un factor importante para el transporte de moléculas o adsorbatos.

---

<sup>136</sup> Biochar for environmental management. Science and technology. 2012. p. 448. Disponible en: <[https://books.google.com.co/books?id=NjngCgAAQBAJ&dq=adjacent+pores+zhang&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.co/books?id=NjngCgAAQBAJ&dq=adjacent+pores+zhang&hl=es&source=gbs_navlinks_s)>

Figura 9. Imágenes MEB Biochar BC400.

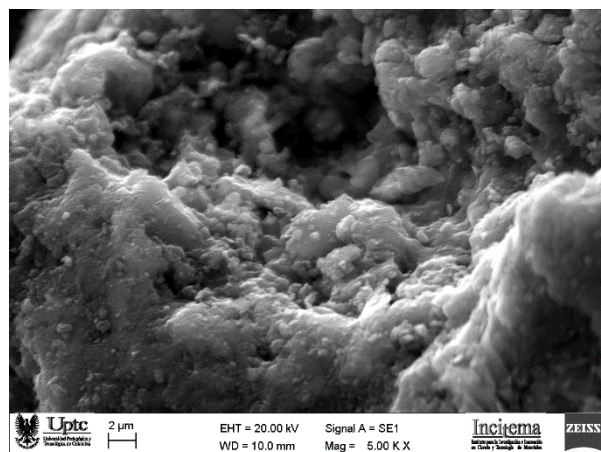
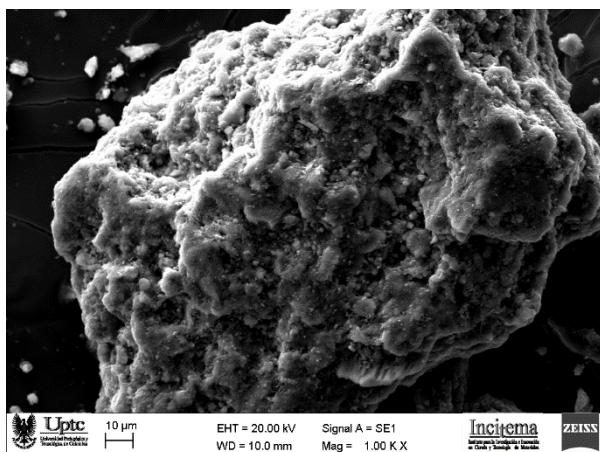
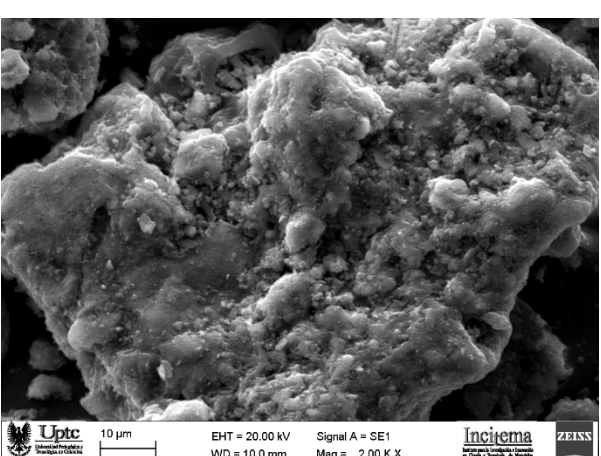
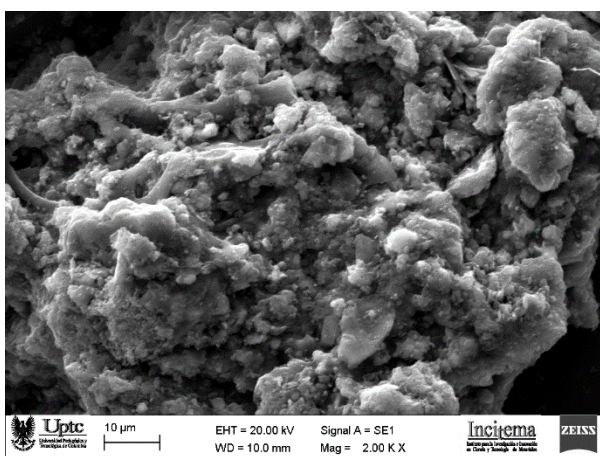
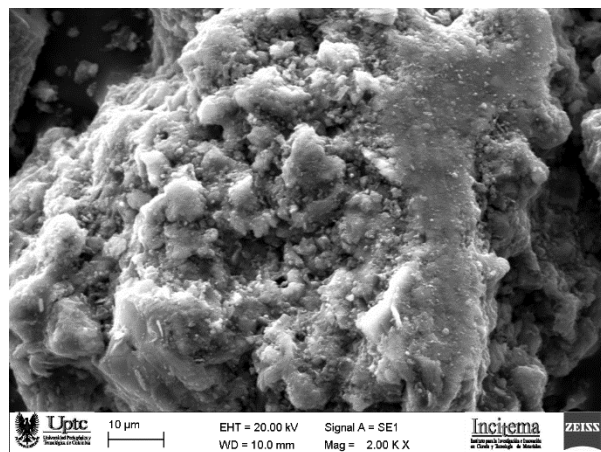
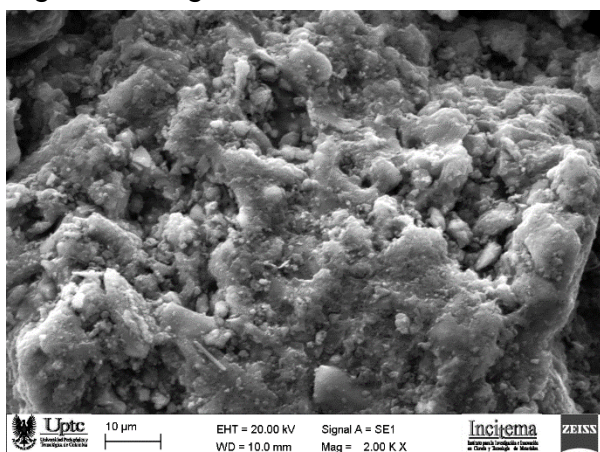
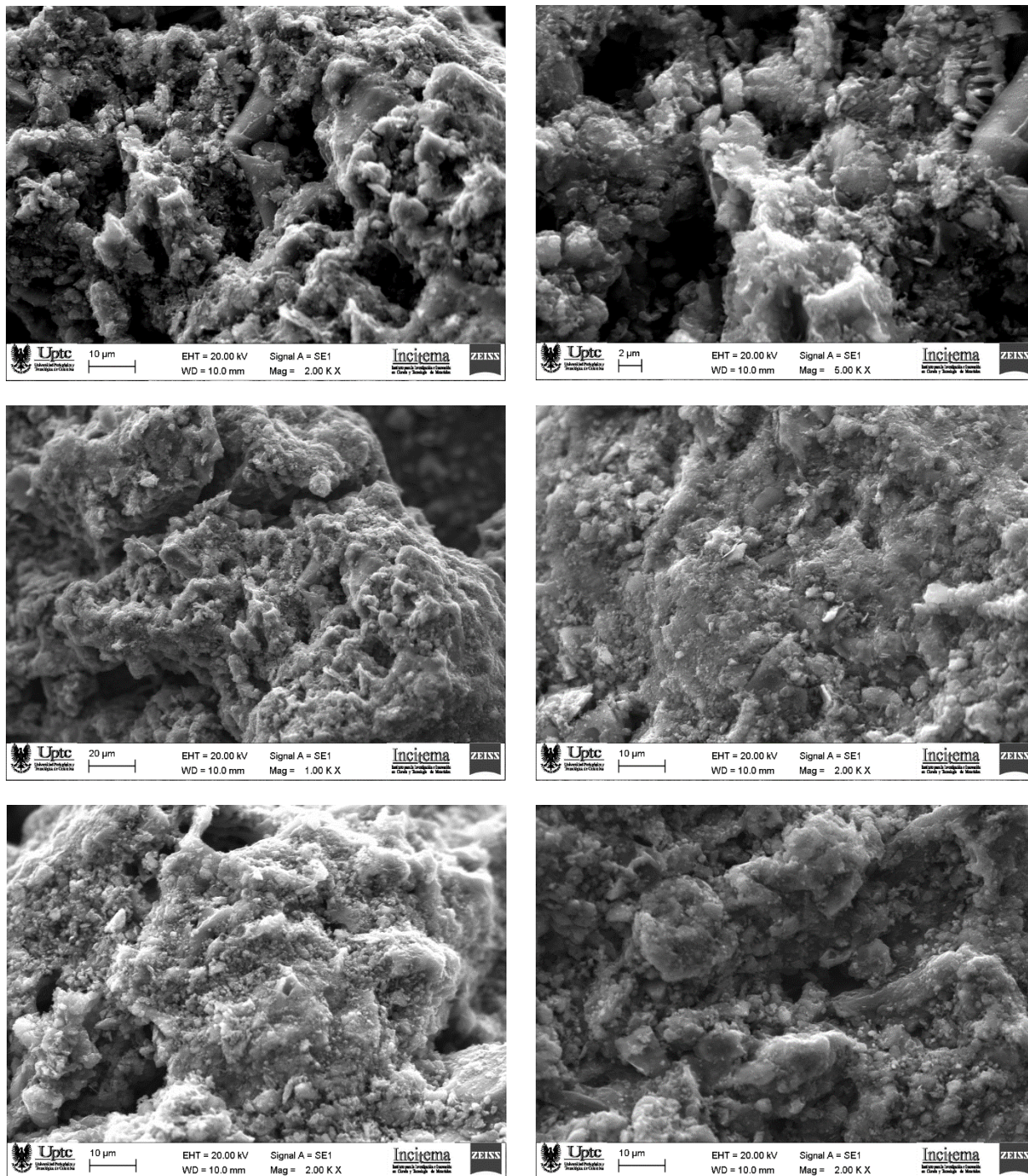




Figura 10. Imágenes MEB Biochar BC500.



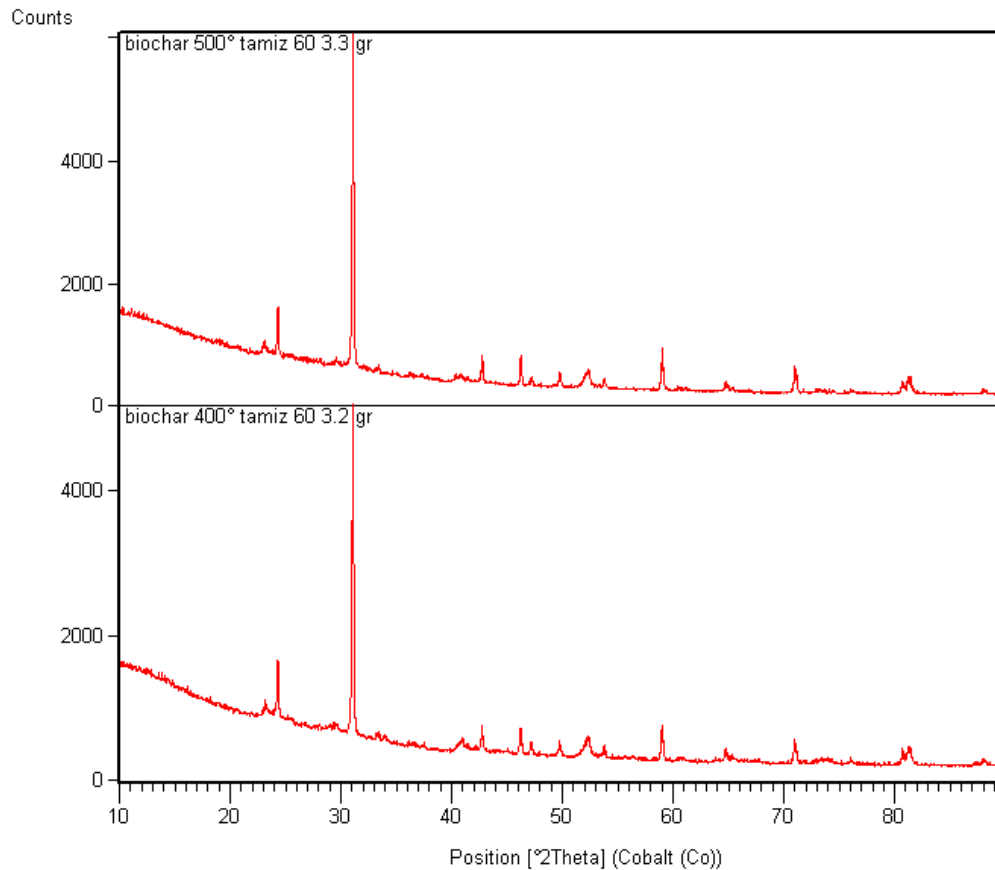
Fuente: (UPTC, INCITEMA, Autores)

#### 4.6 DIFRACCION DE RAYOS X DEL BIOCHAR (XRD).

La Figura 12 representa los difractogramas para el biochar obtenido a 400° y 500° Celsius, y establece la intensidad del haz difractado en función del ángulo  $2(\theta)$ . El análisis de difracción de rayos X para los biochars, muestra un comportamiento similar, formando una estructura cristalina y amorfa, es decir

presentan una forma irregular, identificando un agregado de pequeños materiales de origen mineral, que refleja a su vez un material policristal.

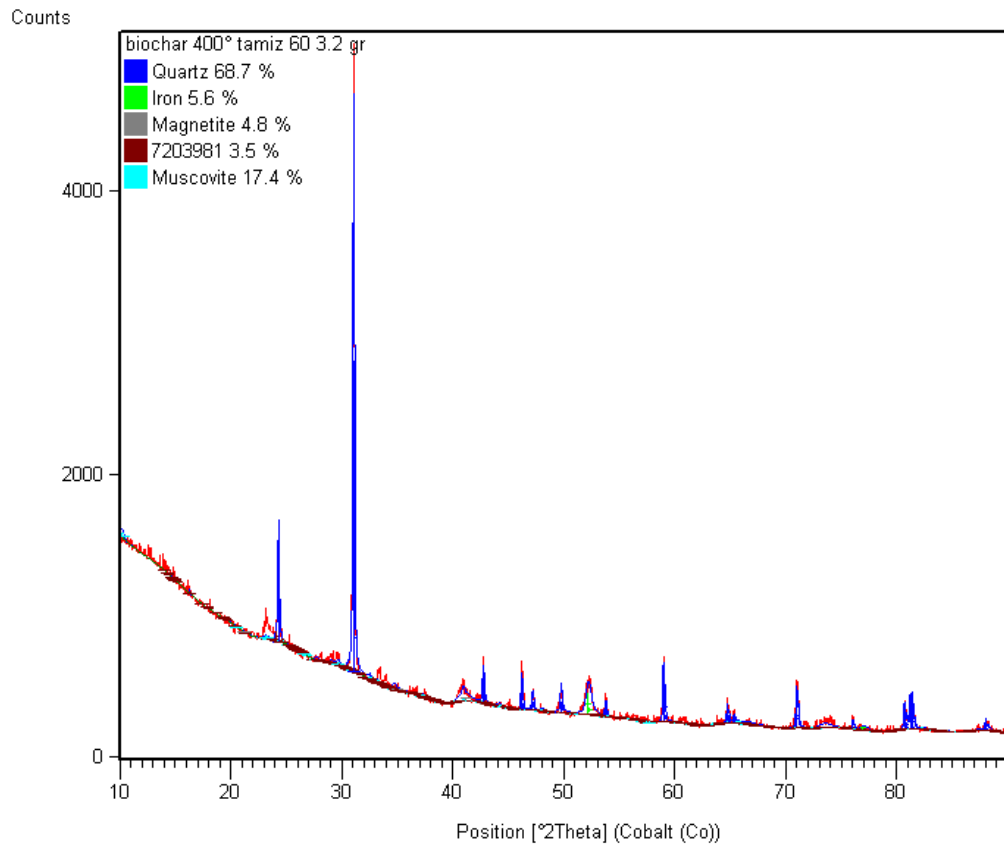
Figura 11. Comparación de los resultados del análisis de difracción de rayos X para los biochars BC400 y BC500.



Fuente: Incitema, Autores

El cuarzo (SiO<sub>2</sub>), con un pico característico a  $2\theta = 31^\circ$ , es la estructura cristalográfica más reconocible en ambos materiales BC400 y BC500. A partir de  $2\theta=60$  se puede observar una disminución en la cristalinidad, dando paso a un material de carácter amorfo. Un incremento en la temperatura de pirólisis, muestra una leve disminución en los picos agudos, representados en la figura 14 para el Biochar obtenido a 500° Celsius, lo cual le confiere un carácter mayormente amorfo comparativamente con el Biochar obtenido a 400° Celsius. Estas variaciones también se pueden atribuir a la volatilización de la celulosa y la pérdida de compuestos volátiles con el aumento de la temperatura de pirólisis.

Figura 12. Difractograma del Biochar obtenido a 400° Celsius.

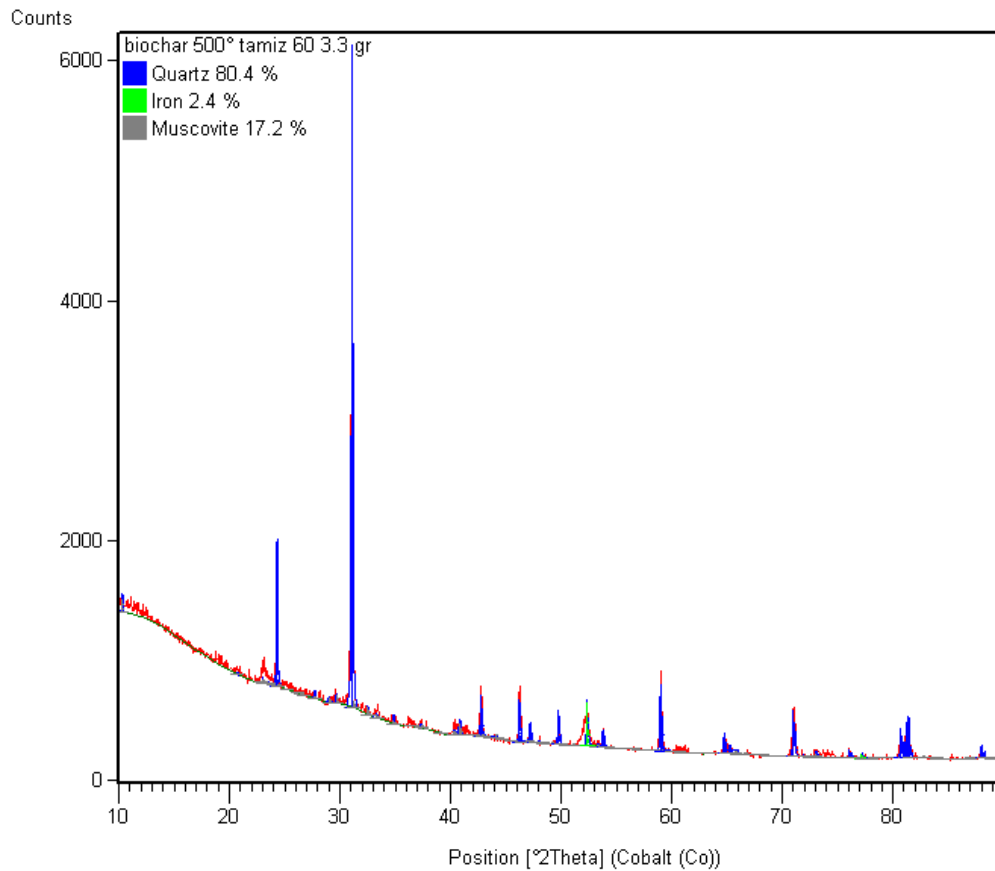


Fuente: INCITEMA, Autores

De acuerdo con el análisis de difracción de rayos X para el Biochar obtenido a temperatura de 400° Celsius, se puede apreciar que los elementos que mayoritariamente lo componen, se encuentra el cuarzo (óxido de Silicio), y la moscovita, que es mineral del grupo de los silicatos. En menor proporción, se encuentran el Hierro, la Magnetita, y finalmente los elementos (C, H, N, S, O). El alto contenido de Silicio, está asociado a cantidades de sedimentos, como suelo, rocas, y arenas, presentes en el biosólido, y que pueden llegar al agua residual por escorrentía. De acuerdo Zhang., et. al., la presencia de óxidos inorgánicos en el biochar asociados al Silicio y al Hierro, se debe a una mayor cantidad de cenizas procedente del biosólido, que conlleva un aumento en la composición mineral del biochar<sup>137</sup>.

<sup>137</sup> ZHANG, Jining., et. al. Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse. Tongji University. Shanghai. 2015. p. 8.

Figura 13. Difractograma del Biochar obtenido a 500° Celsius.



Fuente: INCITEMA, Autores

El Biochar obtenido a una temperatura de 500° Celsius presento una variación en su composición con respecto al biochar obtenido a temperatura final de 400° Celsius, con un mayor porcentaje de cuarzo, y sin la presencia de otros elementos como la magnetita y el material orgánico. El hierro disminuyó su contenido, y la moscovita tuvo un contenido similar al material anterior. La presencia del material orgánico no se evidencio en este Biochar, debido a que se sometió a una temperatura mayor, por lo que el material genera una mayor descomposición, se disminuye el contenido en carbono, y se aumenta la emisión de dióxido de carbono.

#### 4.6 CARACTERIZACION DEL DRENAJE DE MINERÍA Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LA RESOLUCIÓN 0631 DE 2015

En la tabla 14 se muestra el conjunto de parámetros fisicoquímicos del drenaje obtenido de la Mina Los Neisas del Municipio de Samacá, los cuales se determinaron teniendo en cuenta los valores estandarizados y supervisados por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y el Laboratorio de Análisis de Fluidos del INCITEMA en la UPTC.

De acuerdo con la caracterización inicial realizada al drenaje, se evidenció una alta acidez propia de los drenajes ácidos de minas (AMD), además de un



contenido alto en hierro, lo que da un tono anaranjado al efluente. Adicionalmente, se estableció la presencia de metales pesados como Cadmio y Arsénico, dichos metales se encontraron en concentraciones inferiores al valor máximo permisible por la Norma Colombiana.

A su vez, se presenta una elevada concentración del anión sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), superior a los contenidos de Ca y Mg, característico en este tipo de aguas. Una alta concentración de sulfatos reportada en la Tabla 14 para el drenaje minero, está asociado al posible proceso de oxidación de la pirita, pirrotina, y jarosita minerales que contribuyen a la acidificación del medio. Según los hallazgos de López y Ward<sup>138</sup>, en Colombia, por ejemplo, la pirita tiene una presencia relativamente abundante en los yacimientos de carbón de las principales regiones mineras. Adicionalmente, los procesos de oxidación de los sulfuros metálicos en los drenajes de entornos mineros, generados por la exposición a la acción atmosférica, especialmente al agua y al oxígeno, conducen a la formación de lixiviados de bajo pH, sulfatos y liberación de iones metálicos como hierro.

Figura 14. Tanques de almacenamiento en la Mina Los Neisas.



Fuente: Autores

Tabla 14. Comparación de los valores obtenidos con los de la Resolución 0631 de 2015.

PARÁMETROS OBTENIDOS DEL DRENAJE DE LA MINA LOS NEISAS				
PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR OBTENIDO	LÍMITE RES. 0631 DE 2015	CUMPLIMIENTO
pH	Unidades de pH	2.8	6.00 – 9.00	No cumple
Dureza Cálcica	mg/L $\text{CaCO}_3$	1501.36	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

<sup>138</sup> MARTÍNEZ LONDOÑO, Edgar Alberto. Remoción de sulfatos de drenajes ácidos de minería de carbón para producción de yeso sintético mediante el uso de un subproducto industrial. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín Facultad de Minas Escuela de Ingeniería de Materiales. Grupo del Cemento y Materiales de Construcción. Medellín. 2010. p. 78.

<b>PARÁMETROS OBTENIDOS DEL DRENAJE DE LA MINA LOS NEISAS</b>				
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2502.27	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	450	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfatos SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/L	19000	1.200	No cumple
Hierro	mg/L	930	2.00	No cumple
Cadmio	mg/L	<0.05	0.05	Cumple
Arsénico	mg/L	<0.1	0.1	Cumple

Fuente: Autores

Con base en los resultados descritos en la tabla 14, el efluente de la mina Los Neisas no cumple para algunos parámetros analizados, con los límites máximos permisibles por la normativa actual referente a los vertimientos generados por la extracción de carbón. Con respecto a los metales pesados, Cadmio y Arsénico no se presentaron en concentraciones significativas.

#### 4.6.1 Eficiencia de los sistemas de tratamiento

Porcentajes de remoción de contaminantes: Para determinar la efectividad de cada sistema de tratamiento para la remoción de hierro y sulfatos en el drenaje ácido minero, se estimó el porcentaje de adsorción, a través de la siguiente ecuación:

$$\%Remoción = \left( \frac{C_i - C_e}{C_i} \right) * 100 \quad (Ec. 13)$$

Donde  $C_i$  es la concentración inicial del metal en (mg/L) y  $C_e$  es la concentración del metal obtenida en el tiempo experimental en (mg/L).

Capacidad de adsorción: La capacidad de adsorción del Biochar se calculó a través de la siguiente expresión:

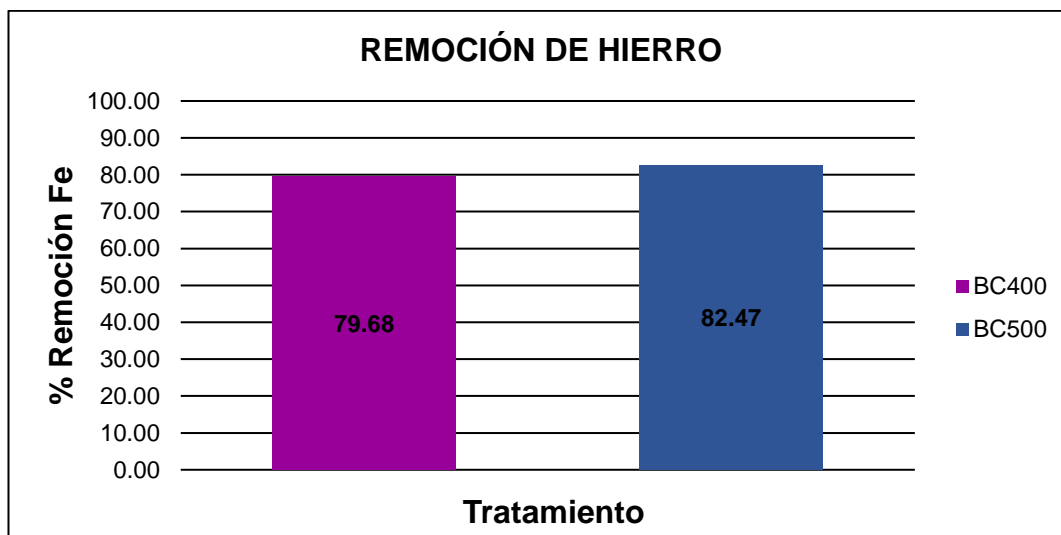
$$Q_e = \left( \frac{C_i - C_e}{w} \right) * V \quad (Ec. 14)$$

Donde  $V$  es el volumen de la solución en litros y  $W$  es el peso del biochar en gramos.



#### 4.6.2 Análisis en la remoción de hierro por adsorción en el drenaje ácido minero.

Gráfica 3. Porcentaje de remoción de Hierro en cada tratamiento.



Fuente: Autores

Resultados experimentales obtenidos por algunos autores han establecido que la tasa de adsorción de contaminantes y elementos metálicos, está condicionada por la adsorción física, y se incluye mecanismos como la quimisorción, que implica fuerzas de valencia a través del intercambio de electrones entre el adsorbente y el adsorbato.

Los mecanismos de adsorción de hierro en el biochar involucran la adsorción física, a los grupos funcionales como oxígeno y carbono de naturaleza ácida. La influencia del pH es uno de los parámetros más importantes en el proceso de adsorción. El efluente minero presentó un bajo pH, el cual genera un mayor aporte de iones  $H^+$  los cuales pueden disociarse.

Oyedeji., et. al., realizaron un estudio de adsorción utilizando cascara de coco para la eliminación de hierro y otros metales en un efluente de residuos industriales, los resultados indicaron que un mayor porcentaje en la remoción de iones metálicos como hierro, superior al 90%, se obtiene al utilizar un pH más alto en la solución, con un valor óptimo de 5 a 6.5, debido a que la superficie del adsorbente se desprotona y se carga negativamente, por tanto se genera una mayor atracción con los cationes cargados positivamente<sup>139</sup>. En este sentido, una mayor concentración de iones  $H^+$ , con un pH por debajo de 4 del drenaje minero, ocasiono un incremento en la repulsión electrostática de los cationes metálicos, generando una menor eliminación de hierro. No obstante, valores demasiado altos en el pH resultan inapropiados en los estudios de adsorción del metal hierro, debido a la formación de precipitados con relación a un aumento de iones

<sup>139</sup> OYEDEJI, O., et.al. Removal of copper (II), iron (III) and lead (II) ions from Mono-component Simulated Waste Effluent by Adsorption on Coconut Husk. Department of Science Laboratory Technology. Federal Polytechnic. Nigeria. 2010. p. 382-387.

OH<sup>-140</sup>. Por tanto, se esperarí obtener mejores resultados en la eliminación de Hierro del efluente minero, utilizando un pH con un valor cercano a 6.

También se debe tener en cuenta, que una concentración inicial de hierro alta, como en el caso del efluente minero de estudio, puede saturar los sitios de unión o sitios activos libres del biochar, y por lo tanto es un factor limitante en la capacidad de adsorción del biochar. En este sentido, Elaigwu., et. al.,<sup>141</sup> afirman que la competencia por los sitios de unión entre moléculas del adsorbato debería disminuir con el aumento en la dosis del adsorbente.

Se puede establecer que existe un factor limitante en la tasa de remoción del metal, al utilizar una concentración inicial demasiado alta asociado con los sitios activos del adsorbente, la capacidad de adsorción de los adsorbentes es influenciada por su estructura química superficial. De acuerdo con Sud., et. al., los grupos funcionales carboxilo y hidroxilo en varios biosorbentes, facilitan la complejación del metal, y presentan una alta eficiencia y afinidad en la adsorción de metales pesados<sup>142</sup>. Las muestras de biochar presentaron un mayor contenido en la fracción inorgánica, lo cual puede afectar las propiedades de adsorción debido a que un alto contenido de cenizas puede bloquear los sitios activos del adsorbente.

Tabla 15. Comparación de las capacidades de adsorción de diferentes materias adsorbentes para los iones Fe (II).

<b>ADSORBENTE</b>	<b>pH</b>	<b>RANGO DE CONCENTRACIÓN mg/L</b>	<b>CAPACIDAD DE ADSORCIÓN (mg/g)</b>
Carbón activado de cascara de coco	6	20-100	81.89
Residuos de corteza de pino	5	55.6-111.2	2.03
Quitosano	5	3-9	57.5
Mezcla de membrana de Quitosano/ Macrogol	5	2-10	90.9
Ceniza de cascara de arroz	5	2-40	6.21
Biochar BC400	2.8	930	111.15
Biochar BC500	2.8	930	115.05

Fuente: ZHANG Ying ., et.al.

<sup>140</sup> Ibid., p. 383

<sup>141</sup> ZHANG Ying . Biosorption of Fe(II) and Mn(II) Ions from Aqueous Solution by Rice Husk Ash. School of Resource and Environment. Northeast Agricultural University. China. 2014. Disponible en: <<https://www.hindawi.com/journals/bmri/2014/973095/>>; Autores

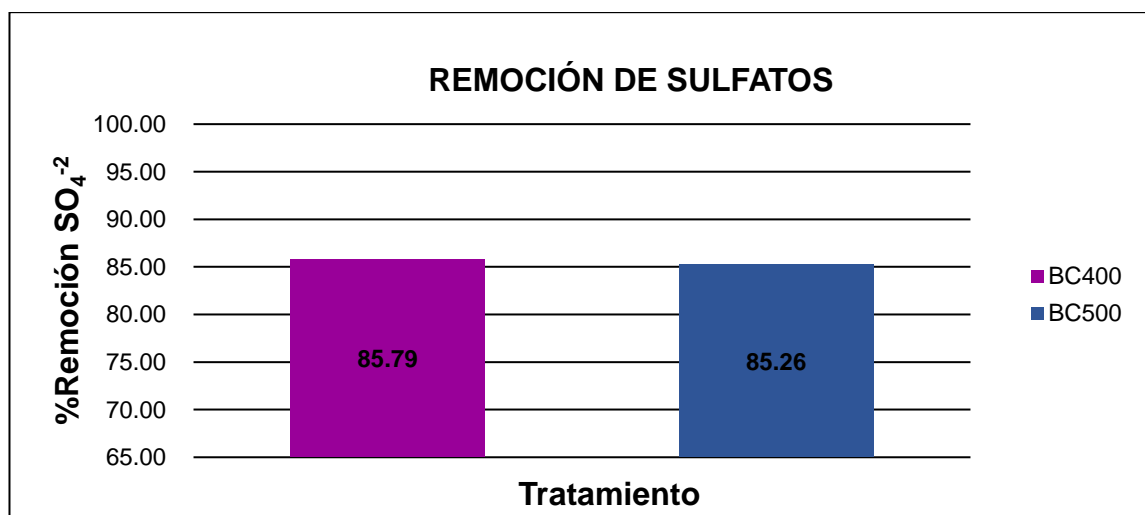
<sup>142</sup> ADEBAYO, G.B; MOHAMMED, A. A; SOKOYA, S.O. Biosorption of Fe (II) and Cd (II) ions from aqueous solution using a low cost Adsorbent from Orange Peels. Department of Industrial Chemistry. Faculty of Physical Sciences. University of Ilorin. Kwara State. Nigeria Department of Chemistry. Faculty of Physical Sciences. University of Ilorin. Kwara State Nigeria. Vol. 20. 2016. p. 13.

La tabla 15 proporciona las capacidades de diferentes adsorbentes para la eliminación de Hierro en soluciones. Se pueden observar diferentes capacidades de adsorción para este ion metálico, dependiendo de la naturaleza física y la composición química de los diferentes materiales utilizados en la eliminación de hierro. Las muestras de Biochar, demuestran una buena capacidad de adsorción para hierro en el tratamiento del agua ácida minera con altas concentraciones de este metal.

#### 4.6.3 Análisis de la remoción de sulfatos en el drenaje ácido

En el caso de los sulfatos, la gráfica es ilustrativa de los mayores porcentajes de remoción de estos compuestos con los tratamientos. A pesar de no alcanzar una eliminación superior, su eficacia es buena, teniendo en cuenta los valores de concentración inicial de sulfatos que se encontraba en el DAM.

Gráfica 4. Porcentajes de remoción de sulfatos en cada tratamiento.



Fuente: Autores

La remoción de sulfatos en soluciones de agua a través de procesos de adsorción se ha asociado a compuestos como la magnetita, por medio de la adherencia a la superficie de la magnetita de forma covalente. A su vez, la presencia de iones de calcio en la solución podría mejorar la adsorción al material, debido al aumento en la carga superficial.

La adsorción de los iones de sulfato se puede ver afectada por el efecto del pH, la muestra del drenaje minero utilizada presentaba un pH inferior a 3, la cual se ajustó con  $\text{HNO}_3$  para su conservación, la adición de estos compuestos, puede inhibir la adsorción a la superficie del Biochar, debido a una mayor competencia por los aniones  $\text{NO}_3^-$  y los iones sulfatos por adherirse a la superficie del adsorbente.

Los mecanismos de adsorción de los aniones sulfatos en la superficie del biochar involucran inicialmente una precipitación por la presencia de óxidos metálicos como el calcio y el magnesio, y los iones férricos presentes en el biochar.

La capacidad de adsorción para contaminantes aniónicos está determinada por el número de sitios funcionales cargados y de la dispersión, afinidad y accesibilidad superficial de los sitios activados dentro del adsorbente. Además Takaya., et. al., concluyeron que la constitución mineral del biochar juega un papel más prominente en la adsorción del biochar que el área superficial disponible para la adsorción<sup>143</sup>. Sin embargo, se ha establecido que la estructura superficial macroporosa del biochar proporciona sitios o rutas para el transporte de moléculas de adsorbato, que a su vez, son adecuados para la adsorción, en este caso los aniones sulfatos pueden adherirse a la superficie del biochar por los mecanismos de intercambio.

El proceso de adsorción el biochar se rige por las interacciones específicas entre el marco adsorbente y las moléculas del sulfato. La presencia de óxidos de hierro en el biochar mejoran el rendimiento en el procesos de adsorción de los sulfatos, los cristales minerales que componen las muestras del biochar como la magnetita pueden mejorar los adsorción de los iones metálicos de hierro.

De acuerdo con Namasivayam y Sureshkumar el efecto del pH de la solución influye directamente en la capacidad de adsorción, debido a que un pH inferior se genera un grado de protonización más alto en la superficie del adsorbente, y por lo tanto la superficie ofrece una carga positiva máxima para la adsorción del sulfato<sup>144</sup>. En las soluciones ácidas, como en los drenajes ácidos mineros, los aniones sulfato se pueden intercambiar con los contraiones de los sitios protonados del biochar<sup>145</sup>. Por tanto, se puede señalar que el proceso de adsorción de los iones sulfatos se debe a un mecanismo de intercambio.

Tabla 16. Capacidad de adsorción de los biochars BC400 y BC500 para sulfatos.

	<b>Concentración final mg/L (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>)</b>	<b>%Remoción</b>	<b>Capacidad de Adsorción Q<sub>e</sub> (mg/g)</b>
<b>BC400</b>	2700	85.79	2445
<b>BC500</b>	2800	85.26	2430

Fuente: Autores

Debido al pH de la solución inferior a 3, la capacidad de adsorción de sulfatos en los biochars atribuida a la precipitación puede verse disminuida, debido a que los precipitados se pueden asociar a mecanismos de intercambio de ligandos entre los grupos hidroxilos del adsorbente que se presentan a valores de pH más altos en solución y los aniones sulfato<sup>146</sup>.

Cao., et. al., han reportado remociones de 79% de sulfatos en soluciones utilizando residuos agrícolas como adsorbentes a partir del intercambio aniónico.

<sup>143</sup> TAKAYA, C.A., et. al. Phosphate and ammonium sorption capacity of biochar and hydrochar from different wastes. Chemosphere. Volume 145. 2016. pp. 518-527

<sup>144</sup> NAMASIVAYAM, Chinnaiya; SURESHKUMAR Molagoundampalayam V. Removal of sulfate from water and wastewater by surfactantmodified coir pith, an agricultural solid 'waste' by adsorption methodology. Environmental Chemistry. Division Department of Environmental Sciences Bharathiar. University Coimbatore. India. 2007. p. 7.

<sup>145</sup> Ibid., p. 131.

<sup>146</sup> Ibid., p. 131.

En DAM, se han realizado estudios de remoción de sulfatos usando carbón activado modificado, en donde se identificaron el volumen del poro y la superficie cargada positivamente como los parámetros más importantes en la captura de sulfatos para que se puedan difundir a los sitios funcionales del adsorbente<sup>147</sup>. El efecto del pH en la adsorción de los aniones sulfatos también fue estudiado por Sadeq, quien utilizó carbón activado como adsorbente y encontró que la remoción de estos aniones está ligada al intercambio iónico<sup>148</sup>.

#### 4.6.4 Resultados para los sistemas de tratamiento

En las siguientes tablas 17 y 18 se presenta el consolidado de resultados para los sistemas de tratamiento con los biochars BC400 y BC500, de igual manera se realiza una comparación con los parámetros establecidos y los límites impuestos por la Resolución 0631 de 2015, para analizar los cambios y mejorías del drenaje ácido minero, así como el cumplimiento de la norma.

Tabla 17. Comparación de los valores obtenidos del tratamiento del drenaje utilizando la muestra BC400 con los de la Resolución 0631 de 2015<sup>149</sup>.

<b>CARACTERIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL DRENAJE MINERO CON EL BIOCHAR BC400</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tratamiento Biochar BC400</b>	<b>Límite Resolución 0631</b>	<b>Cumplimiento Resolución 0631</b>
pH	Unidades	3.12	6-9	No cumple
Conductividad	mS/cm	4,8	No aplica	No aplica
Turbiedad	UNT	1.04	No aplica	No aplica
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2101,9	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1101,01	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Magnésica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1000,90	No aplica	No aplica
Calcio	mg/L (Ca)	441,1	No aplica	No aplica
Magnesio	mg/L (Mg)	243	No aplica	No aplica
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	300	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2700	1.200	No cumple
Hierro	mg/L (Fe)	189	2	No cumple

Fuente: Autores

<sup>147</sup>FARAHMAND, E., et. al. Kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies of sulphate adsorption from aqueous solution using activated carbon derived from rice Straw. Universidad de tehran. Tehran. 2015. p.72-81.

<sup>148</sup> SADEQ, Mohammed., Removal of sulfate from waste water by activated carbon. Universidad de Bagdad. Al – khawarizmi Engineering Journal. Vol. 5. 2009. p. 72-76

<sup>149</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. Op. cit. p. 10.

Tabla 18. Comparación de los valores obtenidos del tratamiento del drenaje utilizando la muestra BC500 con los de la Resolución 0631 de 2015<sup>150</sup>.

<b>CARACTERIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL DRENAJE MINERO CON EL BIOCHAR BC500</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>unidades</b>	<b>Tratamiento Biochar BC500</b>	<b>Límite Resolución 0631</b>	<b>Cumplimiento Resolución 0631</b>
pH	Unidades	3.16	6-9	No cumple
Conductividad	mS/cm	4,7	No aplica	No aplica
Turbiedad	UNT	2.88	No aplica	No aplica
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2001.82	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1000,91	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Magnésica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	1000,91	No aplica	No aplica
Calcio	mg/L (Ca)	401	No aplica	No aplica
Magnesio	mg/L (Mg)	243	No aplica	No aplica
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	290	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2800	1.200	No cumple
Hierro	mg/L (Fe)	163	2	No cumple

Fuente: Autores

Con los tratamientos BC400 y BC500, se evidenció una notable reducción en la concentración de Hierro y los sulfatos. Sin embargo, no alcanzaron a ubicarse por debajo del límite máximo establecido por la Norma Colombiana. El pH tuvo un leve aumento con cada tratamiento, y no cumple con el rango estipulado por la Norma. Los otros parámetros como las Durezas Total y Cálcica, así como la Acidez total presentaron una reducción con los tratamientos y se deben monitorear continuamente.

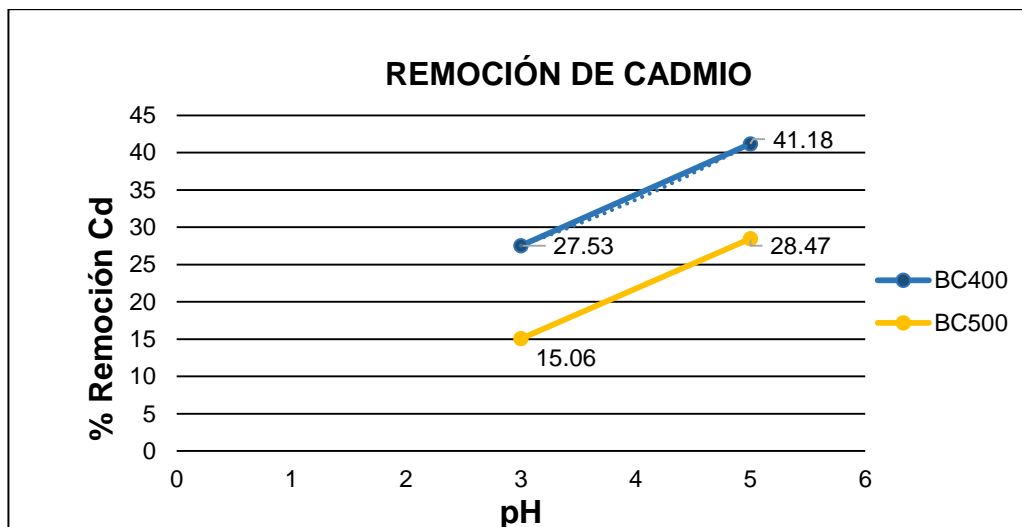
#### **4.7 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE ADSORCIÓN DE CADMIO EN EL AGUA SINTÉTICA.**

Los estudios de adsorción en el agua sintética fueron ejecutados con valores de pH de 3 y 5, y utilizando las muestras del biochar BC400 y BC500 obtenidas mediante pirólisis, los resultados de las concentraciones finales de cadmio se obtuvieron a partir del análisis de absorción atómica, realizado en el Laboratorio de Análisis de Fluidos del INCITEMA en la UPTC.

En la gráfica 5 se presentan los porcentajes de remoción de Cadmio para los dos tratamientos, y su variación con los diferentes valores de pH de la solución.

<sup>150</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. Op. cit. p. 10.

Gráfica 5. Porcentajes de remoción de Cadmio basados en el pH de la solución sintética.



Fuente: Autores

#### 4.7.1 Efecto del pH sobre la adsorción

El pH de la solución se considera un factor determinante en la adsorción, dado que establece las propiedades superficiales del adsorbente con relación a los grupos funcionales y la carga superficial<sup>151</sup>.

De acuerdo con los estudios de adsorción obtenidos en este trabajo, a un pH de 5, la eficiencia de remoción de cadmio en el agua sintética, fue más alta para los adsorbentes utilizados, que con un pH de solución de 3. Así mismo, los porcentajes de remoción aumentaron usando la muestra BC400. Forstner y Wittman<sup>152</sup>, indicaron que el efecto del pH bajo genera una disminución en la remoción del metal, debido al alto potencial de iones hidronio  $H^+$ , para competir con los cationes metálicos por los sitios de adsorción en la superficie del adsorbente, además los cationes metálicos se liberan en condiciones ácidas.

Por tanto, se puede establecer que en el experimento utilizando un pH de solución de 3, una mayor cantidad de iones Hidronio en solución compiten con los iones metálicos, por la unión de los grupos funcionales a la superficie del biochar. De esta forma, el incremento en las cargas positivas ( $H^+$  y  $H_3O^+$ ) en el sistema, incrementa las repulsiones electrostáticas y debilita las capacidades de adsorción de los biochars para  $Cd(+2)$ <sup>153</sup>. Cuando el pH de la solución aumentó gradualmente a 5, las capacidades de adsorción de los BC400 y BC500, aumentaron notoriamente, alcanzando capacidades de adsorción de 0.87 mg/g y 0.60 mg/g respectivamente para cada biochar. Como los experimentos se

<sup>151</sup> SENTHIL, P. et. al. Thermodynamic and kinetic studies of cadmium adsorption from aqueous solution onto rice husk. Universidad Anna. India. Brazilian journal of chemical engineering. Vol. 27. 2010. p.347-355.

<sup>152</sup> RAO, K.S. Review on cadmium removal from aqueous solutions. International Journal of Engineering. Science and Technology Vol. 2, No. 7. 2010. pp. 81-103.

<sup>153</sup> ZHOU, Li., et. al. Adsorption Properties of Nano- $MnO_2$ -Biochar Composites for Copper in Aqueous Solution. China. 2017. p. 13.

realizaron con pH de 3 a 5, el cadmio en la solución se puede considerar completamente en estado iónico, y por lo tanto son más solubles, aumentando la capacidad de adsorción según lo observado por Olayinka., et.al<sup>154</sup>.

Un estudio realizado por Zhou., et. al., pudo establecer que un pH>4, reduce notablemente la concentración de iones  $H_3O^+$ , lo que resulta beneficioso para la adsorción de iones metálicos en la superficie del adsorbente<sup>155</sup>. Este fenómeno también está relacionado con los mecanismos de intercambio dado que las cargas superficiales de óxidos como  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , y  $Al_2O_3$ , algunos de estos presentes en el biochar, dependen principalmente del pH de la solución.

Madala., et. al., reportaron que las adsorciones máximas de cadmio se obtienen con un pH óptimo de 6, debido a que un aumento del pH por encima de este valor, se presenta hidrólisis de los iones metálicos, y se incrementa la concentración de iones hidroxilo y especies aniónicas<sup>156</sup>. En este sentido se pueden presentar precipitaciones con valores de pH de solución mayores a 7, debido a la disminución en la solubilidad de los iones del metal. Otra investigación obtuvo una mayor capacidad de remoción de cadmio en medio alcalino (pH 9), con una eficiencia del 100%<sup>157</sup>.

#### **4.7.2 Efecto de la fuerza iónica en la adsorción.**

Algunos estudios han demostrado que la capacidad de adsorción de adsorbentes para metales pesados disminuye con el aumento de la fuerza iónica<sup>158</sup>. Esto podría indicar, que la capacidad de adsorción de cadmio en esta investigación podría ser suprimida ligeramente por un aumento en la concentración de Hidróxido de Sodio, en la solución con pH ajustado a 5. En este sentido, los iones  $Na^+$  podrían competir con los iones  $Cd^+$  para los sitios cargados negativamente, e impedir la adsorción de Cadmio en los sitios superficiales debido a la repulsión electrostática.

#### **4.7.3 Capacidad de adsorción del biochar para Cadmio.**

Las capacidades de adsorción de las muestras BC400 y BC500 para el metal cadmio en la solución sintética fue determinada con la ecuación 14.

---

<sup>154</sup> OLAYINKA, KO., et. al. Removal of chromium and nickel ions from aqueous solution by adsorption on modified coconut husk. Journal environmental science. 2009. p. 286-293.

<sup>155</sup> XU Lei., et. al. Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies on the Adsorption of Cadmium from Aqueous Solution by Modified Biomass Ash. Bioinorganic Chemistry and Applications. 2017. p. 9. Disponible en: <<https://www.hindawi.com/journals/bca/2017/3695604/>>

<sup>156</sup> MADALA, Suguna., et. al. Equilibrium, kinetics and thermodynamics of Cadmium (II) biosorption on to composite chitosan biosorbente. Arabian Journal of Chemistry. Vol 10. 2017. p. 1883-1893.

<sup>157</sup> CIESIELCZYK, Filip; BARTCZAK Przemysław; JESIONOWSKI Teofil. Removal of cadmium (II) and lead(II) ions from model aqueous solutions using sol-gel-derived inorganic oxide adsorbent. Adsorption. 2016. p.445-458.

<sup>158</sup> ZHOU, Li., et. al. Op. cit. p. 7.



Tabla 19. Comparación de las capacidades de adsorción de cadmio para varios materiales adsorbentes.

	pH	Concentración inicial Cd mg/L	% Remoción Cd	Capacidad de adsorción $Q_{exp}$ mg/g
<b>BC400</b>	3	4.25	27.53	0.58
	5	4.25	41.18	0.87
<b>BC500</b>	3	4.25	15.06	0.32
	5	4.25	28.47	0.60
Carbón activado	6	-	-	20.36
Zeolita	6.5	9-90	76	6.72
Zeolita sintética	-	100-2000	-	315.65
Biochar	5	-	-	28.1

Fuente: XU Lei., et. al. Autores

En la tabla 19 se identifican algunos adsorbentes empleados en procesos de remoción de cadmio. Los biochars obtenidos en el presente estudio mostraron una baja capacidad de adsorción, y una menor eficiencia en la remoción del metal comparativamente con los otros materiales. Algunas propiedades favorecen la adsorción en materiales como el carbón activado y la zeolita, debido a su amplia área superficial, su buen mecanismo de intercambio iónico, y el carácter hidrofílico de la zeolita, que los hace adecuados en la adsorción de cadmio<sup>159</sup>. A su vez, los procesos de modificación y activación proporcionan mayor acceso a los poros, mejorando la eliminación del metal pesado.

En este sentido, una mayor eficiencia de remoción de metales pesados está condicionada por la estructura del sólido carbonoso, el grado de porosidad y una amplia área superficial<sup>160</sup>. Dada la macroporosidad del biochar de este estudio, y por tanto una baja área superficial, se presentó un menor acceso de los iones metálicos  $Cd^{+2}$  a las estructuras internas del poro, lo que generó una baja remoción del metal pesado.

#### 4.8 EFECTO DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOCHAR

Los componentes que se originan durante el proceso de pirólisis de la materia prima juegan un papel importante en la adsorción. Los biochars obtenidos mediante pirólisis de los biosólidos, mostraron una disminución en su fracción orgánica, la cual se vio sustituida por un contenido mayor de cenizas y material mineral. Algunas investigaciones han confirmado que más del 90% de la

<sup>159</sup> ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Technical Bulletin. Choosing an adsorption system for voc: Carbon, Zeolite, or Polymers? Estados Unidos. 1999. p. 25.

<sup>160</sup> RENU; Agarwal, Madhu; SINGH K. Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review. Department of Chemical Engineering. Malaviya National Institute of Technology. India. 2017. p. 33.

adsorción de cadmio se debe a enlaces orgánicos y grupos carbonatos<sup>161</sup>. Se puede establecer que una baja adsorción de cadmio en el Biochar, puede estar asociada a una baja composición orgánica, la cual se atribuye a reacciones de complejación con la materia húmica del biochar, como grupos funcionales carboxilo libres, grupos hidroxilo libres, entre otros.

No obstante, Xu., et. al.,<sup>162</sup> concluyeron en el estudio de adsorción de Cadmio con cenizas modificadas de biomasa, que la presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno, minerales que contienen Silicio contribuye significativamente a la adsorción de metales pesados como Pb y Cd, algunos óxidos minerales como SiO<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> fueron componentes principales en los biochars de este estudio. De acuerdo con Han., et. al., parte de la adsorción de los metales pesados en el Biochar, ocurre a través de interacciones electrostáticas entre especies de metales positivas y grupos funcionales negativos<sup>163</sup>. Estas interacciones están relacionadas con la esfera electrostática, la co-precipitación y las reacciones de complejación de la esfera interna con la materia húmica y los óxidos minerales del biochar.

Los enlaces inorgánicos y los carbonatos del biochar tienen una gran influencia sobre la adsorción de especies metálicas como el cadmio. La adsorción de cadmio en la fracción orgánica se puede atribuir a la complejación con la materia orgánica del biochar, como grupos funcionales carboxilo libres, hidroxilo libres.

---

<sup>161</sup> CUI, Liqiang., et. al. Does Biochar Alter the Speciation of Cd and Pb in Aqueous Solution? Bioresources. p. 88-104.

<sup>162</sup> XU Lei., et. al. Op. cit.

<sup>163</sup> HAN, Lu., et. al. Lead adsorption by biochar under the elevated competition of cadmium and aluminum. Scientific Report. 2017. p. 11.

## 5. CONCLUSIONES

- En el proceso de la descomposición térmica del biosólido a través de la pirólisis, las temperaturas finales utilizadas condicionaron el porcentaje de la fracción sólida, por lo cual, se obtuvo un menor rendimiento con una mayor temperatura final de pirólisis, debido a que se favorecen las transformaciones secundarias y se genera una mayor volatilización de los compuestos orgánicos del material residual.
- Los datos obtenidos para el análisis elemental y próximo del biosólido resultaron ser similares a otros materiales de la misma procedencia. No obstante, el poder calorífico del biosólido tuvo un valor superior con respecto a otras materias primas. La aplicación de la pirólisis del biosólido como proceso termoquímico, resulta ser una alternativa apropiada que favorece una adecuada disposición de este subproducto, así mismo dado su poder calorífico se puede considerar como un sustituto de combustibles sólidos convencionales, que permita la mitigación de los impactos ambientales. La máxima energía de pirólisis y el poder calorífico del biochar, pueden tener un uso potencial en el ámbito energético, sin embargo el alto contenido en cenizas del biochar podría ser una limitante como combustible en algunas aplicaciones.
- El porcentaje de cenizas se considera un parámetro importante que determina el material incombustible. El alto contenido de cenizas en las muestras de biochar, está asociado a un mayor contenido inorgánico del biosólido, lo cual fue consistente con el análisis de difracción de rayos X donde se reportaron compuestos minerales y un descenso en el contenido orgánico, este efecto generó un descenso en el contenido de carbono fijo, y por ende, tuvo un impacto negativo sobre el poder calorífico del biochar; no obstante el material volátil del biochar podría facilitar una rápida ignición y mayor reactividad del material.
- El drenaje ácido generado en la mina de carbón Los Neisas ubicada en el Municipio de Samacá, presentó las características propias de este tipo de efluentes, pH muy bajo, alto contenido de hierro y sulfatos. De acuerdo con las mediciones realizadas a varios parámetros fisicoquímicos, el efluente minero no cumple con la normativa legal vigente, y podría generar riesgos al ecosistema, por lo cual es prioritario un tratamiento para mejorar las características del agua.
- Las concentraciones de hierro y de sulfatos, presentaron una notable reducción posterior al tratamiento del drenaje minero con el biochar. A su vez, las capacidades de adsorción de las muestras BC400 y BC500 para hierro y sulfatos indican que estos adsorbentes tienen una efectividad similar. Sin embargo, estos parámetros no cumplen con los valores establecidos por la normativa actual vigente.

- La capacidad de adsorción de los elementos metálicos puede verse afectada por la masa del adsorbente aplicada a la solución. Debido a que la concentración de hierro inicial en el drenaje minero de estudio era significativa, pudo saturar los sitios activos del biochar, disminuyendo su capacidad de remoción. Por tanto, un aumento en la masa del biochar podría mejorar la capacidad de adsorción, facilitando mayores sitios disponibles para la captación del metal.
- De acuerdo con las remociones obtenidas para hierro y los sulfatos en el drenaje minero, el biochar se puede considerar como un adsorbente eficaz, de bajo costo, y sostenible ambientalmente que representa, un alto potencial uso en la industria minera
- Los resultados del estudio de adsorción en el agua sintética indicaron que la aplicación de los tratamientos con los biochars presenta un bajo potencial para la adsorción de cadmio, y por tanto, este adsorbente es una alternativa poco eficaz en la remoción del metal en esta solución. Adicionalmente, se obtuvo una mayor remoción utilizando un pH más alto en la solución. En este sentido, el pH se evidenció como un parámetro determinante en el proceso de adsorción de cadmio en el agua sintética, debido a que puede influir en los sitios activos del biochar y por ende, fue predominante el mecanismo de intercambio iónico.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda mejorar los procesos de deshidratación y filtración en los lechos de secado de la Planta de Tratamiento de aguas residuales de Sotaquirá, con el fin de obtener un bajo porcentaje de humedad inicial del biosólido, para reducir los tiempos de secado previos a la preparación y caracterización del material, y de esta forma, incrementar los contenidos energéticos del subproducto.
- Para mejorar la caracterización del biochar, es recomendable realizar un análisis más completo del material. Por lo que se aconseja, conocer el área superficial, el volumen de los poros, la densidad aparente y reconocer los grupos funcionales a través del análisis de fluorescencia de rayos X. Con relación al biosólido, es prioritario determinar la composición química, para identificar los metales pesados y los nutrientes, y establecer el grado de toxicidad y las restricciones asociadas a su uso.
- En el proceso de experimentación del biochar con el agua sintética, es pertinente modificar la concentración inicial de cadmio, para evaluar la capacidad de remoción con una mayor presencia de iones metálicos y analizar el comportamiento del biochar en el proceso de adsorción.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en la remoción de contaminantes, se aconseja realizar una activación del biochar, para mejorar la estructura porosa e incrementar el área superficial, promoviendo la adherencia de los elementos en el biochar, y en este sentido, aumentar la eficiencia en los tratamientos.
- En los procesos de adsorción del biochar, es pertinente modificar y aumentar las dosis de adsorbente aplicadas a las soluciones, teniendo en cuenta que se puede promover una mayor eficacia en la remoción de los metales, generando mayores sitios activos para la captura de los metales, y por lo tanto alcanzar una mejor remoción, que a su vez permita cumplir con el rango establecido por la norma.
- En los estudios de adsorción, se considera importante modificar algunas variables como el pH, la temperatura, los tiempos de contacto, y las dosis del adsorbente, que permita evaluar y comparar la eficiencia del biochar tanto en el tratamiento del DAM como en el agua sintética.

## BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA

ADEBAYO, G.B; 2MOHAMMED, A. A; 3 SOKOYA, S.O. Biosorption of Fe (II) and Cd (II) ions from aqueous solution using a low cost Adsorbent from Orange Peels. Department of Industrial Chemistry. Faculty of Physical Sciences. University of Ilorin. Kwara State. Nigeria Department of Chemistry. Faculty of Physical Sciences. University of Ilorin. Kwara State Nigeria. Vol. 20. 2016. p. 13.

AGRAFIOTIA, Evita., et. al. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis: Biochar production by sewage sludge pyrolysis. [base de datos en línea]. [Citado en 10 de diciembre de 2013].

ALBORNOZ PINEDA, Angie Mabel; ORTEGA VALENCIA, Elmer Mauricio. “Evaluación de la eficiencia de la lombriz roja californiana E. Foetida para estabilización de lodos residuales de la PTAR Salitre”. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad Santo Tomas de Aquino. Facultad de Ingeniería. 2017. Bogotá, 2017, 87 h.

ARAGONEZ GONZÁLEZ, Martha Patricia. Análisis Termo gravimétrico de la Pirólisis de Biosólidos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre. Trabajo de Grado (Magister en Ingeniera - Ingeniera Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Bogotá, D.C., Colombia. 2015. p. 105.

BERENGUER, Julia Moltó. Descomposición térmica de residuos textiles; estudio cinético y formación de contaminantes. Universidad de Alicante. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química. Alicante. 2007. p. 307.

Biochar for environmental management. Science and technology. 2012. p. 448. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=NjngCgAAQBAJ&dq=adjacent+pores+zhang&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.co/books?id=NjngCgAAQBAJ&dq=adjacent+pores+zhang&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

BLANCO HERNÁNDEZ, Angel Luis., et. al., Estudio de los niveles de plomo, cadmio, zinc y arsénico, en aguas de la provincia de Salamanca. Rev Esp Salud Pública 1998, Val. 73. N.” 1.

BOLÍVAR MELÉNDEZ, Nydiana Astrid; BETANCUR, John; RODRÍGUEZ VALENCIA Nelson. Estudio evaluativo de manejo de biosólidos en el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad Cooperativa de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá-Colombia. Universidad de Manizales, Centro de Investigaciones CIMAD, No. 37, pp. 1–10.

CANO LONDOÑO, Natalia Andrea “Análisis mediante el método emergético de la disposición de los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. (Aplicación a una PTAR en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá).” Medellín, 2012, p. 178. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.

CANTRELL, Keri B., et. al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. Bioresource Technology 2012. p. 10.

CAPODAGLIO, A.G. Properties and beneficial uses of biochar from sewage sludge pyrolysis. Department of Civil Engineering & Architecture. University of Pavia. Pavia. Italy. Disponible en <[http://uest.ntua.gr/athens2017/proceedings/presentations/A\\_G\\_Capodaglio.pdf](http://uest.ntua.gr/athens2017/proceedings/presentations/A_G_Capodaglio.pdf)>

CARDONA GUTIÉRREZ, Anahí Fernanda; CABAÑAS VARGAS, Dulce Diana; ZEPEDA PEDREGUERA, Alejandro. Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida-México. Ingeniería, vol. 17, núm. 1, enero-abril, 2013, pp. 1-9.

CETIN, E., et. al. Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. En: Fuel. Volumen 83. 2004. p. 2139-2150.

CHAPARRO LEAL, Laura Teresa. Drenajes Ácidos de Mina. Formación y Manejo En: Revista ESAICA Sección Ingeniería Ambiental. Québec-Canadá. Vol.1 n°1, junio 2015, p. 53-57.

CIESIELCZYK, Filip; BARTCZAK Przemysław; JESIONOWSKI Teofil. Removal of cadmium (II) and lead(II) ions from model aqueous solutions using sol–gel-derived inorganic oxide adsorbent. Adsorption. 2016. p.445–458.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (17 de Marzo de 2015). Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2015. p. 62.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287(10, Julio. 2014). Por el cual se establecen criterios para el uso de los

biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2014. 15 p.

COLOMER F.J. Posibilidades de valorización de diferentes lodos de depuradoras. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Badajoz. (Ingeniería de Residuos). 2009. p. 12.

CONSUELO, Ileana., et. al. “Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos “. Medellin. Colombia, vol. 29, no. 1, pp. 64, 2016.

CORTEZ, Vicente. Carbón. p. 47. Disponible en <<http://www.factoria3.com/documentos/CARBON.pdf>>

CUI. Liqiang., et. al. Does Biochar Alter the Speciation of Cd and Pb in Aqueous Solution?. Bioresources. p. 88-104.

DEVASAHAYAM, Sheila; DOWLING, Kim; MAHAPATRA, Manoj. Sustainability in the mineral and energy sectors. 2016. Disponible en: <<https://books.google.com.co/books?id=KCUNDgAAQBAJ&pg=PA504&lpg=PA504&dq=Heating+value+is+the+amount+of+heat+produced+by+a+complete+combustion+of+fuel+and+it+is+measured+as+a+unit+of+energy+per+unit+mass+or+volume+of+substance>>.

Drenaje Ácido de la Minería y Contaminación de Agua en la Columbia Británica, Canadá. Disponible en: <[https://miningwatch.ca/sites/default/files/amd\\_esp.pdf](https://miningwatch.ca/sites/default/files/amd_esp.pdf)>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Technical Bulletin. Choosing an adsorption system for voc: Carbon, Zeolite, or Polymers?. Estados Unidos. 1999. p. 25.

EPA, 40 CFR Part 503 - STANDARDS FOR THE USE OR DISPOSAL OF SEWAGE SLUDGE., [en línea], - 26 Octubre de 2017. Disponible en Internet en: <<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/chapter-I>>

ESCALANTE REBOLLEDO, Ariadna., et. al. “Biocarbón ( biochar ) I : Naturaleza , historia , fabricación y uso en el suelo,”. En: Terra latinoamericana. E-ISSN: 2395-8030. [en línea] 2016, 34 [Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2017] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57346617009>> ISSN.

GARCÍA FERNÁNDEZ, Luis Eduardo Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Trabajo de (Magíster en Ingeniería Mecánica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Bogotá, D.C., Colombia 2011. p.112.



FARAHMAND, E., et. al. Kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies of sulphate adsorption from aqueous solution using activated carbón derived from rice Straw. Universidad de tehran. Tehran. 2015. p.72-81.

GARCÍA ROJAS, Norma. Análisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. Quivera [en línea] 2012, 14 (Enero-Junio): [Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2017] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894007>>\_

GARCÍA, R; BÁEZ P. Atomic Absorption Spectrometry (AAS). Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México.

GÓMEZ, Alexander; KLOSE, Wolfgang; RINCÓN Sonia. Pirólisis de Biomasa. Cuesco de palma de aceite. Universidad de Kassel. Kassel: División de Termodinámica – Instituto de Ingeniería Térmica. Universidad Nacional de Colombia, 2008. p. 48

GÓMEZ, Leonardo Alonso., et. al., Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. En:, Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica 19 (2): 341 – 349. 2016.

GRAVALOS Ioannis., et. al., An Experimental Determination of Gross Calorific Value of Different Agroforestry Species and Bio-Based Industry Residues. Department of Biosystems. Engineering, School of Agricultural Technology, Technological Educational Institute of Thessaly, Larissa, Greece. 2017. p. 12

GUPTA Renuka; GARG V.K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting Journal of Hazardous Materials Volume 153, Issue 3 . pp. 1023-1030

GUSTAFSSON, Mattias. Pyrolysis for heat production Biochar – the primary byproduct. Suecia, 2013, p. 89. Master's Thesis in Energy Systems. Gävle University College. Faculty of engineering and sustainable development.

HAN, Lu., et. al. Lead adsorption by biochar under the elevated competition of cadmium and aluminum. Scientific Report. 2017. p. 11.

HUERTA, Oscar; SOLIVA, Montserrat., “Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas,” Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. UPC.,p. 1–9, 2004.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). Biochar Standards Document Archive. Disponible en: <[www.biochar-international.org/node/3340](http://www.biochar-international.org/node/3340)>

Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. Toma de muestras de aguas residuales. IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Versión 3. 2007. pp. 17.

INYANG, Mandu., et. al. Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass. Bioresource Technology. 2012. p. 7.

KHALID RAFIQ, Muhammad., et.al. Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (Zea mays L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. 2011. p. 11.

KHANMOHAMMADI, Zahra; AFYUNI Majid; REZA MOSADDEGHI, Mohammad. Effect of pyrolysis temperature on chemical and physical properties of sewage sludge biochar. Waste Management & Research. 2015. p. 9.

KOMNITSAS, Konstantinos., et. al. Adsorption of scandium and Neodymium on Biochar Derived after low-temperature pyrolysis of Sawdust. Universidad de Atenas. Grecia. Minerals. Vol. 7. 2017. p. 18.

LIMÓN MACÍAS, Juan Gualberto. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso? Trabajo de Grado (Especialidad Ingeniería Química). Guadalajara, Jalisco. 2013. p. 45.

LÓPEZ PALOMINO, Andrea Carolina. “Manejo de biosólidos a raíz de la nueva normatividad en la PTAR Río Frío, Bucaramanga (Santander),”. Especialización en planeación ambiental y manejo integral de los recursos naturales. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería. 2015. p. 14.

LU, Qin; HE, Zhenli L., and STOFFELLA, Peter J., “Land Application of Biosolids in the USA: A Review,” vol. 2012, 2012. En: Hindawi Publishing Corporation Applied and Environmental Soil Science, pp. 11. ID 201462.

MADALA, Suguna., et. al. Equilibrium, kinetics and thermodynamics of Cadmium (II) biosorption on to composite chitosan biosorbente. Arabian Journal of Chemistry. Vol 10. 2017. p. 1883-1893.

MARTÍNEZ LONDOÑO, Edgar Alberto. Remoción de sulfatos de drenajes ácidos de minería de carbón para producción de yeso sintético mediante el uso de un subproducto industrial. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín Facultad de Minas Escuela de Ingeniería de Materiales. Grupo del Cemento y Materiales de Construcción. Medellín. 2010. p. 78.

MCLAUGHLIN, Hugh. Analytical Options for Biochar Adsorption and Surface Area [en línea]. Disponible en: <[http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Analytical\\_Options\\_for\\_Biochar\\_full\\_paper\\_2012.pdf](http://www.micromeritics.com/Repository/Files/Analytical_Options_for_Biochar_full_paper_2012.pdf)> [citado en 1 de abril de 2016]

MEDINA MUÑOZ, Juan Pablo. “Modelamiento y simulación de la pirólisis de una partícula de lodo de aguas residuales en un lecho fluidizado”. Bogotá, 2012, p.164. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de procesos y energía Medellín.

MÉNDEZ FERNÁNDEZ, Andrea. Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje. Universidad De Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Master Oficial en Ingeniería Ambiental, Departamento de Ciencias Agroforestales. Área de Edafología y Química Agrícola Valladolid. 2017. P. 52.

MENDOZA GENEY, Libardo Enrique. Pirólisis de biosólidos en horno rotatorio. Trabajo de Grado (Doctor en Ingeniería- Ingeniería Mecánica y Mecatrónica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá. Colombia. 2016. p. 249.

MIRANDA, Rosa., et. al. Characterization of Pyrolysis Products. Obtained During the Preparation. En: Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon-Characterization Techniques and Applications in the 78 Wastewater Treatment. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

MOBOLAJI B. Shemfe, SAI Gu , PANNEERSELVAM Ranganathan. Techno-economic performance analysis of biofuel production and miniature electric power generation from biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading.

MONROY PEÑA, Camilo Antonio. Modelación Cinética de Pirólisis de Biomasa. Bogotá, 2013, 203 H. Trabajo de Grado (Magister en Ingeniería- Ingeniería Química). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

MONTAÑA ARBELÁEZ, Jorge Ivan., et. al. Pirólisis rápida de biomasa. Ecopetrol. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín, 2014. p. 61

Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Anexo B. Disponible en:

<[http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo\\_B\\_Muestreo\\_caracterizaci%C3%B3n\\_biomasa\\_residual.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Anexo_B_Muestreo_caracterizaci%C3%B3n_biomasa_residual.pdf)>

MURAT, Kilic., et. al. Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by bio-char, a by- product of pyrolysis. Departament of Chemiscal Engieneering. Faculty of Engineering. Anadolu University. Volumen 283. p. 856-862. 2013.

NAMASIVAYAM, Chinnaiya; SURESHKUMAR Molagoundampalayam V. removal of sulfate from water and wastewater by surfactantmodified coir pith, an agricultural solid 'waste' by adsorption methodology. Environmental Chemistry. Division Department of Environmental Sciences Bharathiar. University Coimbatore. India. 2007. p. 7.

NAVARRETE CORDOVA, Mario Alejandro. Estudio de la utilización como combustibles alternativo y plan de disposición final de los neumáticos desechables en la ciudad de Riobamba. Riobamba. Trabajo de grado (Ingeniero en Biotecnología Ambiental). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de Ciencias químicas. Ecuador, 2009, p 133.

OLMO PRIETO, Manuel. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. Departamento de botánica, ecología y fisiología vegetal. Córdoba, 2016, p. 157. Overview of Mining and its Impacts. Guidebook for Evaluating Mining Project EIA. Disponible en: <<https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Chapter1.pdf>>

OLAYINKA, KO., et. al. Removal of chromium and nickel ions from aqueous solution by adsorption on modified coconut husk. Journal environmental science. 2009. p. 286-293.

OYEDEJI, O., et.al. Removal of copper (II), iron (III) and lead (II) ions from Mono-component Simulated Waste Effluent by Adsorption on Coconut Husk. Departament of Science Laboratory Technology. Federal Polytechnic. Nigeria. 2010. p. 382-387.

PÉREZ, Andrea. Efecto de la formación del manto de lodos sobre el comportamiento hidrodinámico de un reactor UASB a escala real. Estudio de caso: Sotaquirá, Colombia. 2014.

PIZARRO Consuelo., et. al., Biomass proximate analysis using thermogravimetry. Bioresource Technology. 2013. p.4.

“Proyecto ECOCERÁMICA – Informe LAYMAN-1.” Disponible en: [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/files/laymanReport/LIFE05\\_ENV\\_E\\_000301\\_LAYMAN.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/files/laymanReport/LIFE05_ENV_E_000301_LAYMAN.pdf).  
<<http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/200882712463.pdf> >

QUESADA KIMZEY, Jaime. La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. En: Tecnología en Marcha. Marzo 2012. Vol. 25, N° 5, p. 14-21.

QUINCHÍA, Adriana; CARMONA, Dora. Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales combinada. En: Escuela de Ingeniería de Antioquia. No. 2 (Agosto.,2004); pp. 89–108. ISSN 1794-1237.

QUINTANA VALENCIA, Judith Marcela. “Estudio para la viabilidad técnica de compostaje a partir de biosólido seco proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Cañaveralejo Cali”. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial). Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería. Programa de Ingeniería Agroindustrial. Cali, 2012.

RAO, K.S. Review on cadmium removal from aqueous solutions. International Journal of Engineering. Science and Technology Vol. 2, No. 7. 2010. pp. 81-103.

RAWLINSON, Ben “Assessing aspects of the effectiveness of biosolids application and soil incorporation assessing aspects of the effectiveness of biosolids application and soil,” 2012., p.16.

RENU; Agarwal, Madhu; SINGH K. Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review. Department of Chemical Engineering. Malaviya National Institute of Technology. India. 2017. p. 33.

RODRIGUEZ PÉREZ, Yaneth. “Estudio preliminar de lotes con diferente historial de incorporación de biosólidos provenientes de la PTAR El Salitre en la escombrera El Corzo , Bogotá” Universidad Nacional de Colombia. 2016. p.14.

ROMERO MILLÁN, Lina María; CRUZ DOMÍNGUEZ, María Alejandra; SIERRA VARGAS Fabio Emiro. Efecto de la temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Centro de investigaciones y desarrollo científico. Tecnura. Vol. 20, Núm. 48 (2016). Disponible en: <<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/10551/12038>>

ROSAS CASTOR, José Martín. Aplicación De Residuos Agrícolas Para El Tratamiento De Agua Contaminada Con Colorantes. Universidad Autónoma De Nuevo León Facultad De Ciencias Químicas. Trabajo de grado (MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientación en Procesos Sustentables). Nuevo León. 2012. p. 113.

ROZO, Nicolás Andrés. “Efecto de la aplicación de mezclas de biosólidos y estériles sobre las primeras etapas de la sucesión en la antigua arenera Juan Rey, Bogotá- DC. Trabajo de grado (Ecólogo): Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de estudios ambientales y rurales. Facultad de Ecología. 2007; p. 92.

SADAKA Samy. Characterization of Biochar from Switchgrass Carbonization. Energies. 2014.p. 548- 567.

SADEQ, Mohammed., Removal of sulfate from waste water by activated carbón. Universidad de Bagdad. Al – khawarizmi Engineering Journal. Vol. 5. 2009. p. 72-76

SALAS CEPEDA, Rodolfo. Estudio de Materiales Nanométricos con Microscopio Electrónico de Barrido SEM. Trabajo de Grado (Maestría en Nanotecnología). Centro de investigación en materiales avanzados. Chihuahua. Chih. 2014.

SAMANYA Janat. Increase of energy recovery from sewage sludge. Aston University. 2013. p. 263.

SÁNCHEZ, M. E., et. al. Bio-Fuels and Bio-Char Production from Pyrolysis of Sewage Sludge. Laboratory of Chemical Engineering, University of León. España. Journal of Residuals Science & Technology, Vol. 6, No. 1. 2009. p. 7.

SENTHIL, P. et. al. Thermodynamic and kinetic studies of cadmium adsorption from aqueous solution onto rice husk. Universidad Anna. India. Brazilian journal of chemical engineering.Vol. 27. 2010. p.347-355.

SLUITER, A. Determination of ash in biomass. A National Laboratory of the U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency y Renewable Energy.

Technical Report. Disponible en: <<http://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42622.pdf>. 2008>.

Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. ASTM D5865 – 13 (2013). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en: <<ftp://185.72.26.245/Astm/1/03/E/ASTM%20E%205865-13.pdf>>

Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. ASTM E1756 – 08(2015). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en: <<ftp://185.72.26.245/Astm/1/03/E/ASTM%20E%201756-08.pdf>>

Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. ASTM E1757 – 01 (2015). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en: <<http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/200882712463.pdf><https://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42620.pdf> >

Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM D5865-13. ASTM VOL-0506. 2013. Disponible en: <<http://www.normadoc.com/spanish/astm-d5865-13.html>>

Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM D3175 – 11(2011). ASTM INTERNATIONAL. Disponible en: <<http://www.razi-foundation.com/Portals/0/Files/standards/ASTM%20D%203175%202011.pdf?ver=1395-08-22-190150-283>>

SENTHIL, P. et. al. Thermodynamic and kinetic studies of cadmium adsorption from aqueous solution onto rice husk. Universidad Anna. India. Brazilian journal of chemical engineering. Vol. 27. 2010. p.347-355.

TAN Xiaofei., et. al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. Chemosphere. 2015. p. 16.

TAKAYA, C.A., et. al. Phosphate and ammonium sorption capacity of biochar and hydrochar from different wastes. Chemosphere. Volume 145. 2016. pp. 518-527

Técnicas de caracterización. Conceptos generales. Disponible en: <[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV\\_T%C3%A9cnicas\\_de\\_caracterizaci%C3%B3n.\\_Conceptos\\_generales.pdf?sequence=8](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2681/IV_T%C3%A9cnicas_de_caracterizaci%C3%B3n._Conceptos_generales.pdf?sequence=8)>.

TORREZ, Patricia; MADERA, Carlos; SILVA, Jorge. “Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas

residuales domésticas,” En: Escuela de Ingeniería de Antioquia. No. 11 (Julio.,2009); pp. 21-37. ISSN 1794-1237.

UPME. El carbón Colombiano. Fuente de energía para el mundo. República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética. p. 53.

URIEN PINEDO, Andrea. “Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual”. Bogotá, 2013, p. 83. Trabajo de grado(Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química). Universidad Nacional de Educación a Distancia. Facultad de Ciencias. Departamento de Ciencias Analíticas.

VÉLEZ ZULUAGA, Juan Alberto. Los biosólidos: ¿Una solución o un problema?. Producción más limpia. Vol. 2 No. 2. Julio - Diciembre 2007. p. 15.

VERA Luisa., et. al., Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. Centro de estudios ambientales. Universidad de Cuenca. Facultad de Química. Ecuador. AFINIDAD LXXIII, 573, Enero - Marzo 2016.

XU Lei., et. al. Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies on the Adsorption of Cadmium from Aqueous Solution by Modified Biomass Ash. Bioinorganic Chemistry and Applications. 2017. p. 9. Disponible en: <<https://www.hindawi.com/journals/bca/2017/3695604/>>

ZHANG, Jining., et. al. Multiscale visualization of the structural and characteristic changes of sewage sludge biochar oriented towards potential agronomic and environmental implication. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse. Tongji University. Shanghai. 2015. p. 8.

ZHOU, Li. Adsorption Properties of Nano-MnO<sub>2</sub>–Biochar Composites for Copper in Aqueous Solution. China. 2017. p. 13.



## ANEXOS

### ANEXO A.

Clasificación de los carbones por rango de acuerdo a la Norma ASTM D 388

	Límites de Carbono Fijo		Límites de Materia Volátil		Límites de Poder Calorífico			
Clase/Grupo	% (Base seca libre de materia mineral)		% (Base seca libre de materia mineral)		%, (Base húmeda libre de materia mineral)			
	Igual o mayor que	Igual o menor que	Igual o mayor que	Igual o menor que	Btu/Lb	Mj/Kg		
					Igual o mayor que	Igual o menor que	Igual o mayor que	Igual o menor que
<b>Antracita:</b>								
Metaantracita	98	...	...	2	...	...	...	...
Antracita	92	98	2	8	...	...	...	...
Semiantracita	86	92	8	14	...	...	...	...
<b>Bituminoso:</b>								
Bajo Volátil	78	86	14	22	...	...	...	...
Medio Volátil	69	78	22	31	14000	...	32,6	...
Alto Volátil A	...	69	31	...	13000	14000	30,2	32,6
Alto Volátil B	...	...	...	...	11500	13000	26,7	30,2
Alto Volátil C	...	...	...	...	10500	11500	24,4	26,7
<b>Subbituminoso :</b>								
Subbituminoso A	...	...	...	...	10500	11500	24,4	26,7
Subbituminoso B	...	...	...	...	9500	10500	22,1	24,4
Subbituminoso C	...	...	...	...	8300	9500	19,3	22,1
<b>Lignito:</b>								
A	...	...	...	...	6300	8300	14,7	19,3
B	...	...	...	...	...	6300	...	14,7